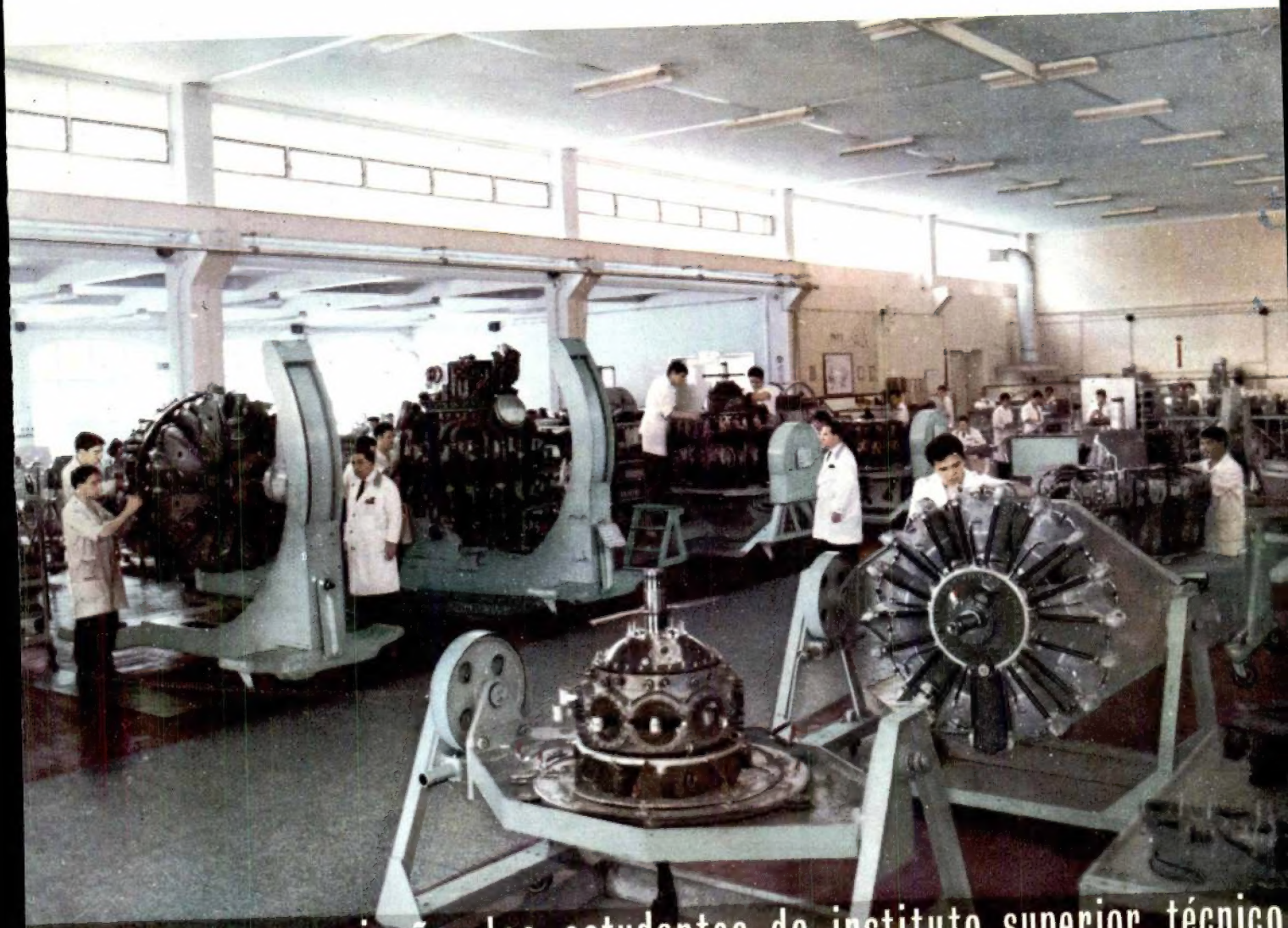
técnica



327

associação dos estudantes do instituto superior técnico

abril 1963

revista de engenharia

CIMENTO SECIL

Fábrica:

Outão – Setúbal

Telef. 228824/5

Escritório:

R. do Comércio, 56-3.º

LISBOA 2

Telef. 328201/2/3

ELECTRO-ARCO
LIMITADA

ELECTRODIOS
POSTOS E ACESSORIOS
PARA A SOLDADURA ELECTRICA

MATERIAL APROVADO PELO
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

FÁBRICA E LABORATÓRIOS
VENDA NOVA — AMADORA
LISBOA
RUA SILVA CARVALHO, 239 — TEL 683649
PORTO
RUA DO BOLHÃO, 216 – TEL 21277

materiais novobra
EM BETÃO PRÉ-ESFORÇADO

PAVIMENTOS

COBERTURAS

VIGAS DE GRANDE VÃO

ASNAS

PERFIS

SOCIEDADE DE PRÉ-FABRICAÇÃO E OBRAS GERAIS NOVOBRA, LDA.
AV. ESTADOS UNIDOS DA AMERICA, LOTE 3, 5.º D. TELEF. 774832/766446 LISBOA-5

TÉCNICA

Ano XXXVIII - N.º 327 Abril de 1963

Redacção e Administração: AVENIDA ROVISCO PAIS, I.S.T. * LISBOA-1. * TELEF. 77 01 44 (Linha 50)

CORPO REDACTORIAL

J. M. VIEGAS GONÇALVES
A. ROMÃO DIAS
J. F. GOMES DE PINA
A. M. L. ESTEVES BRINCA

NUMERO AVULSO 15$00

ASSINATURAS:

	3 N.os	6 N.os	10 N.os
Continente e Ilhas	37$50	60$00	110$00
Ultramar Português e Espanha	—	65$00	120$00
Estrangeiro	—	70$00	130$00

PUBLICAÇÃO PERIÓDICA

EDITOR E PROPRIETÁRIO
ASS. DOS ESTUD. DO I.S.T.

COMPOSTO E IMPRESSO
NA
Tip. JORGE FERNANDES, L.DA
RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

SUMÁRIO

CAPA — Recondicionamento de motores nas Oficinas Gerais de Material Aeronáutico

Págs.

A política de fomento e o ensino da engenharia
Por Domingos Moura 441

Arranque síncrono de turbo-alternadores
Por Carlos Ferrer Moncada 445

Aplicação do método das analogias eléctricas ao estudo de alguns problemas relativos ao campo magnético das máquinas eléctricas
Por Carlos de Medeiros Portela 463

Notas informativas — Elementos sobre a produção e o consumo de energia na rede eléctrica nacional 494

Correlação entre as tensões de rotura de argamassas e betões de cimento Portland normal
Por F. F. Guedes Soares 495

Medidas de pressão em condutas forçadas
Por Nuno Martins 515

Biblioteca 519

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

Índice Alfabético dos nossos anunciantes

A

Pág.

Agência Comercial, Lda. IV
A. Johnson & Co (Portugal), Ltd. . . XXXVII
Agro-Mecânica XXVIII
Asea Eléctrica Ld.ª XXVIII

C

CUF — Centro de Projectos XV
CIDEX IV
Cimento Secil . . . . . 2.ª da capa
Cimianto XLIII
Cometna XVIII
Companhia de Cimentos Brancos . . VIII
Comp.ª de Cimentos do Cabo Mondego XLIV
Companhia Portuguesa de Fornos Eléctricos IX
Companhia Portuguesa dos Petróleos BP XXXIV
Companhia Portuguesa de Trefilaria XXIV
Companhia União Fabril XIV
Construções Técnicas, Ltd.ª XXXIII
C. Santos, Ltd.ª . . . . . VI e XXXVI

E

Electro-Arco, Ltd.ª . . . . . 2.ª da capa
Electrotécnicos Reunidos XXXII
Emílio de Azevedo Campos & C.ª, Ltd.ª XXX
Empresa Electro Cerâmica XLIV
Empresa de Produtos Asfálticos. . . X
Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte, Ltd.ª . . . . . 3.ª da capa
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos XI
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações XXIV
Empresa de fundações A. Cavaco . XLII

F

Fábrica Portugal II
Fanafel XVI
Filfro, Lda. XXVI

G

Guedes & Almeida, Lda. XLIII

H

Harker Sumner & C.ª, Ltd. XXXII
Hydrel XXVI

I

Pág.

Impermeábilis XXIV
Isolux, Lda. XLII

J

Jayme da Costa, Lda XIX

M

Metalúrgica Duarte Ferreira XXX
Monterroso & C.ª, Lda. XL

O

Orlando Fernandes XVI

P

Papelaria Fernandes XXIX
Philips XVII
Pimentel & Casquilho, Ltd.ª III

Q

Quimicor, S.A.R.L. . . . . XXI e XXII

S

Sanfer, Lda. XL
S. E. Moniz da Maia & Vaz Guedes, L.da XIII
Siemens XXXI
Soabal, Ltd. XXIII
S. Com. de Isolamentos de Cortiça XXXIII
SMEIA XXV
Soc. Comercial Romar, Lda. . . XV e XX
Sociedade Construtora Portuguesa, Ltd.ª I
Sociedade Michaelis de Vasconcellos XII
Société Louis de Roll V
Sociedade Comercial Luso-Italiana XXXIX
Sociedade de Electricidade Brown Boveri . . . . . 4.ª da capa
Sociedade Industrial Metalúrgica . XLIII
Sociedade Portuguesa Cavan VIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco XLII
Sondagens Ródio, Ltd.ª XLII
Standard Eléctrica VII
S. T. F. T. . . . . (Intercalado)

V

Vasco Pessoa, Lda. XXXII

W

Wild Portugal, Lda. XXVII

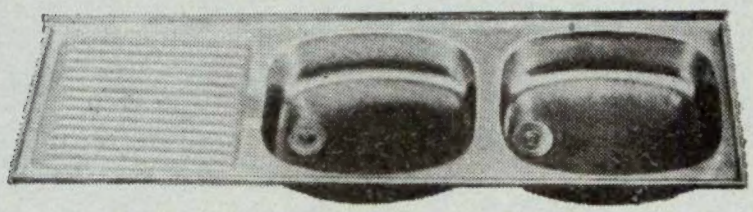
Montepio de Moçambique — Lourenço Marques

Assente sobre
ESTACAS FRANKI

FUNDAÇÕES FRANKI, L.DA

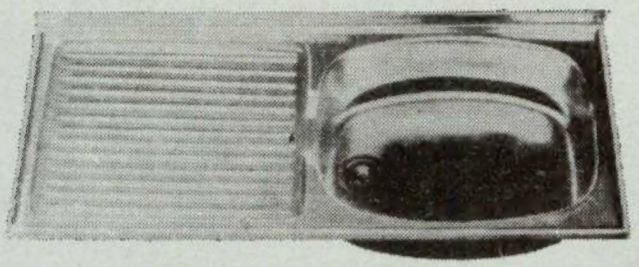
Rua Braamcamp, 13, 3.º LISBOA 1 Telefone 73 41 12 3 linhas

LAVA-LOUÇAS EM AÇO INOXIDAVEL



Modernize os lares de Portugal, usando nas suas cozinhas Lava-Louças em AÇO INOXIDAVEL. Concepção e execução da

FABRICA PORTUGAL



elegantes e higiénicos · duração ilimitada · revestidos de isolante especial · fornecidos com sifão de segurança · não partem a louça

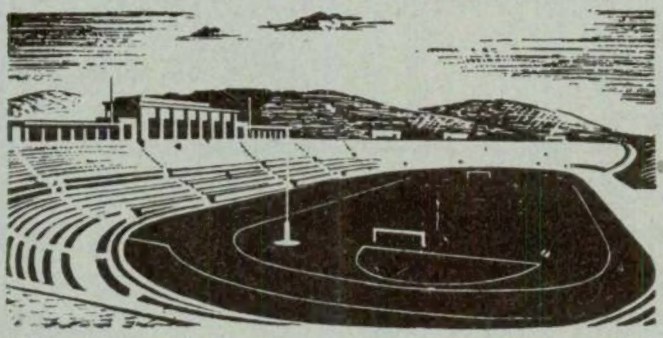
- 8 MODELOS STANDARD · OUTROS MODELOS FORA DE SÉRIE
- MODELOS ESPECIAIS PARA GRANDES INSTALAÇÕES
- IGUAIS AOS MELHORES ESTRANGEIROS

À VENDA NAS BOAS CASAS DA ESPECIALIDADE E NOS SEUS SALÕES DE EXPOSIÇÃO E VENDA

PRAÇA DOS RESTAURADORES · RUA FEBO MONIZ

PIMENTEL & CASQUILHO, L.DA

QUASE 40 ANOS
AO SERVIÇO DA
ENGENHARIA PORTUGUESA



GRANDE SORTIDO
DE INSTRUMENTOS DE
PRECISÃO, CIENTÍFICOS
E INDUSTRIAIS

RUA JARDIM DO REGEDOR, 24, 2.º
LISBOA
TELEF.: 32 43 14 — 32 42 48 ✦ TELEG.: TECNA

Bombas centrífugas «PACIFIC»

Construídas por

Batignolles - Chatillon

Especialmente destinadas para:

— Petróleos
— Indústrias químicas
— Construções navais
— Centrais eléctricas
— Alimentação de caldeiras
— Etc., etc.

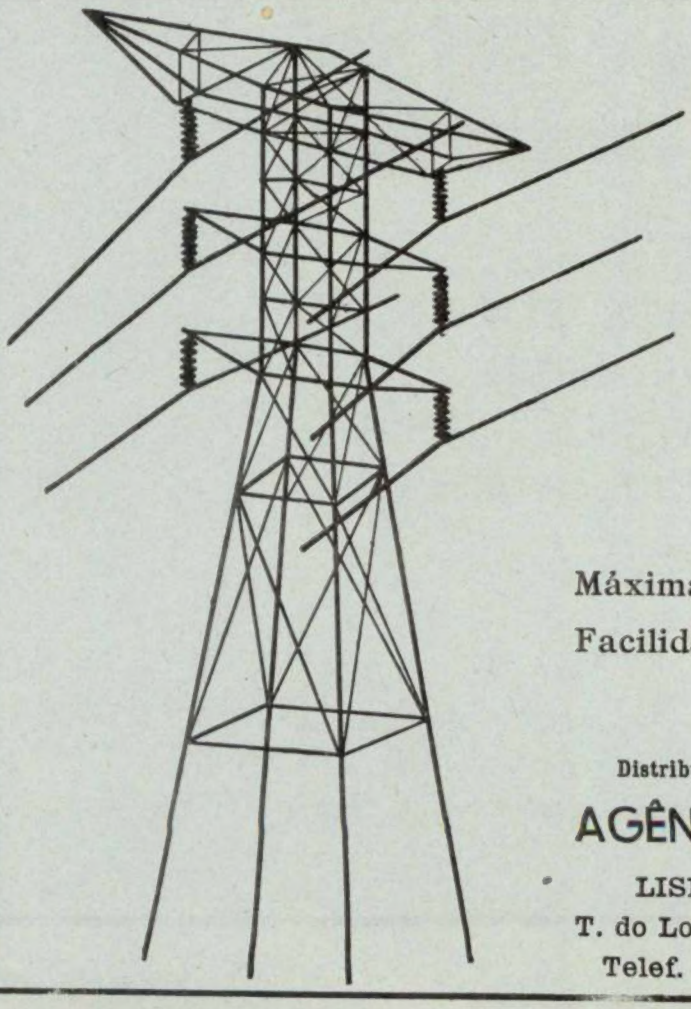
Sob as condições de funcionamento seguintes:

— Débitos: 1 m³/h a 10.000 m³/h
— Pressões: altas e baixas
— Temperaturas: −180° C + 500° C
— Líquidos: corrosivos ou não

Para estudos e orçamentos, consultar o representante em Portugal:

CIDEX — Comércio Internacional
e Representações Industriais, Lda.

Av. Casal Ribeiro, 46-2.°/Telef. 73 53 07/LISBOA 1



METALIZAÇÃO A FRIO

NEODON

NEODON + ZINCO =
NEODONZINKGRUND

Máxima protecção
Facilidade de aplicação

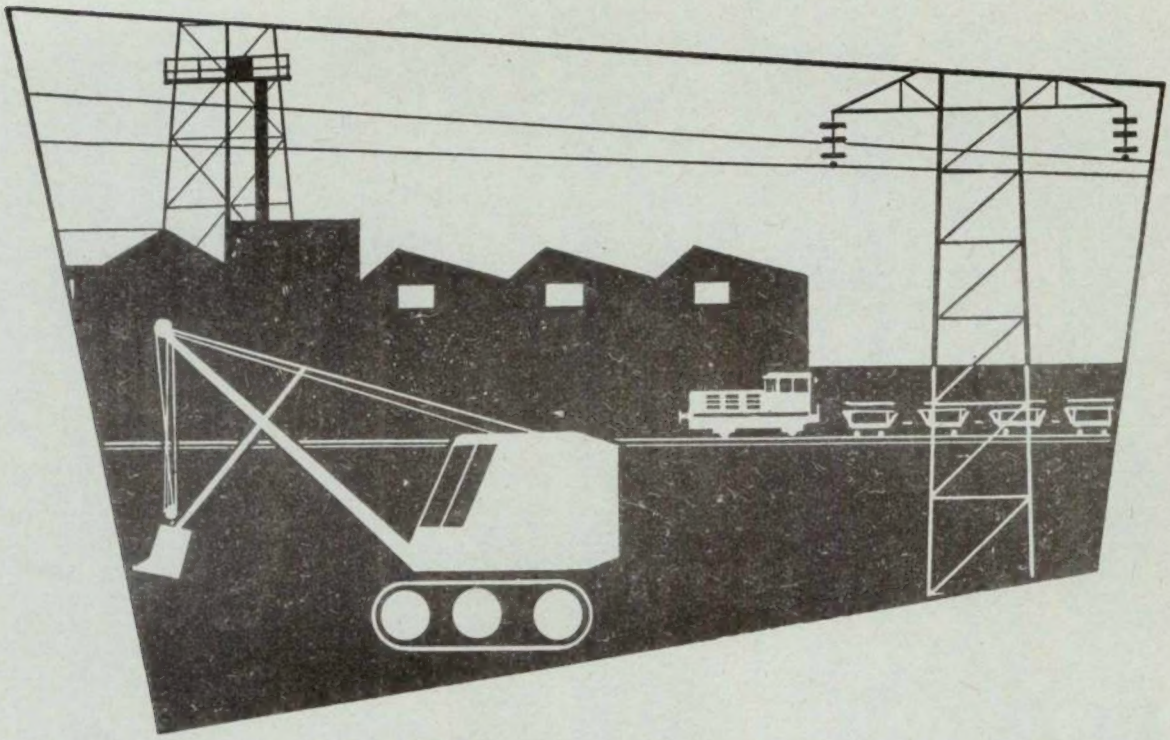
Distribuidores exclusivos:

AGÊNCIA COMERCIAL, L.DA

LISBOA
T. do Loureiro, 3
Telef. 4 90 54

ÉVORA
R. da República, 93
Telef. 2 33 63

Válvulas de cunha, para vapor
lacas de obturação articuladas sobre uma
esfera Estanqueidade permanente
1 Válvulas de passagem
Sede de estanqueidade e haste de aço
inoxidável
2 Válvulas para matérias pastosas
Sem necessidade de conservação (sem
prensas-estopa nem tampas de limpeza)
3 Válvulas de sede obliqua
para ácidos. Liga cromo-niquel-molibdenc
4 Válvulas de membrana de borracha
Sem prensa-estopa
5 Válvulas de macho
Com elevada resistência aos ácidos
6 Válvula de cunha Sem prensa-estopa
à frente no progresso da
construção de válvulas
DE ROLL
Klus (Suiça)
Representantes em Portugal:
Socotel, Lda.
Rua Sá da Bandeira, 651-4°, Porto
Tel 27013
1
2
3
4
5
6



MERCEDES-BENZ

MOTORES INDUSTRIAIS DIESEL

MOTORES PARA TODAS AS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS
FAMOSOS EM TODO O MUNDO PELA SUA GRANDE ROBUSTÊS, ECONOMIA
DE CONSUMO E FACILIDADE DE MANUTENÇÃO
MODELOS DESDE 15 A 2.500 H. P.

EM ARMAZÉM:

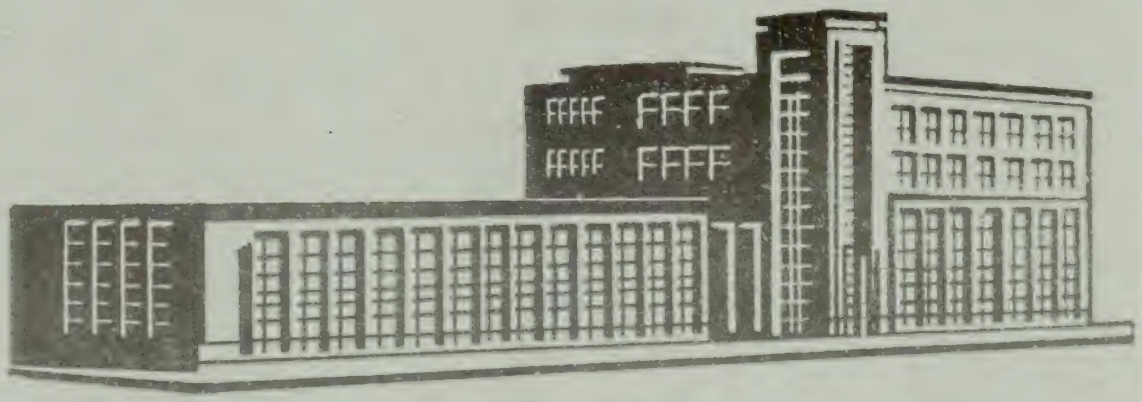
MODELO M B 841 B	25 H. P. — 1.000 R. P. M.
MODELO M 202 B	55 H. P. — 1.200 R. P. M.
MODELO M 203 B	90 H. P. — 1.200 R. P. M.
MODELO M 204 B	120 H. P. — 1.200 R. P. M.

OUTROS MODELOS PARA ENTREGA MUITO RÁPIDA

MOTORES A 4 TEMPOS · ARREFECIMENTO POR ÁGUA
ARRANQUE A AR COMPRIMIDO OU ELÉCTRICO

REPRESENTANTES C. SANTOS LDA. — DIVISÃO MARÍTIMA E INDUSTRIAL

29, AV. DA LIBERDADE, 41 — LISBOA
160, R. DE S.TA CATARINA, 168 — PORTO



Standard Electrica S.A.R.L.

Associada da

INTERNATIONAL TELEPHONE AND TELEGRAPH CORPORATION

DE NOVA YORK

TELECOMUNICAÇÕES

ELECTRÓNICA

AV. DA INDIA — LISBOA

O EMPREGO DO CIMENTO BRANCO...

permite acabamentos mais perfeitos, mais duradouros e muito mais económicos

Estude a vantagem do emprego do

CIMENTO BRANCO LUSO

Consulte os distribuidores gerais

No Sul: **SCIAL** — T. do Corpo Santo, 15 — Telef. 66 61 86 — Lisboa
No Norte: **SCIAL** — R. do Bonjardim, 205 — Telef. 2 5779 — Porto

CAVAN

SOCIEDADE PORTUGUESA

✱

POSTES DE BETÃO PARA LINHAS ELÉCTRICAS
MOSAICOS E AZULEJOS

COLUNAS PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA
MANILHAS PARA ESGOTOS

✱

RUA D. ESTEFÂNIA, 94-A
TELEF. 47812-50129
LISBOA

COMPANHIA PORTUGUESA DE FORNOS ELÉCTRICOS

PRODUTORA DE

FERRO GUSA

FERRO LIGAS

FERRO-MANGANÊS

SÍLICO-MANGANÊS

FERRO-SILÍCIOS

15 % - 25 % - 45 % - 75 % - 90 %

CARBONETO DE CÁLCIO

CIANAMIDA CÁLCICA

PASTA PARA ELÉCTRODOS

E EM MONTAGEM

GRAFITE

FÁBRICAS
CANAS DE SENHORIM
Telefone 6 72 22

SEDE
Largo de S. Carlos, 4 2.º — LISBOA
Telefones 32 53 43 - 3 55 56 - 36 89 89

Celulite

ISOLAMENTO TÉRMICO DAS CONSTRUÇÕES

PAVIMENTOS

*

TECTOS

*

PAREDES

*

CÂMARAS FRIGORÍFICAS

*

ISOLAMENTOS INDUSTRIAIS

Terraços e pavimentos isolados com CELULITE no edifício da Comp.ª de Seguros Fidelidade — P. das Águas Livres — Lisboa

SETH, LDA. • RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.° • TEL. 73 01 56 — LISBOA

Para impermeabilizar terraços, paredes, fundações, etc.

COLAGEM DE TACOS DE MADEIRA

TELEF. 73 0156 TELEG. EPALDA — LISBOA

EMPREZA DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS

IMPERMEABILISADOR

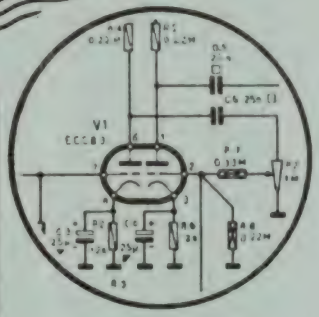
IMEPA

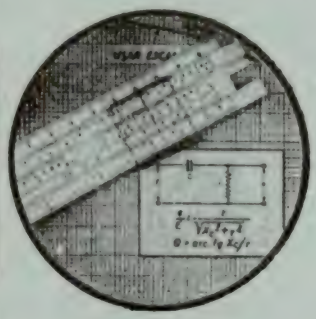
RUA FILIPE FOLQUE, 10-1.º - LISBOA

FÁBRICA EM SACAVÉM

EQUIPAMENTO DE AMPLIFICAÇÃO DE SOM

BEM CONCEBIDO BEM CALCULADO CONSTRUIDO





LESA

A grande marca italiana

Representantes em Portugal

TELECTRA

EMPRESA TÉCNICA DE EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S. A. R. L.

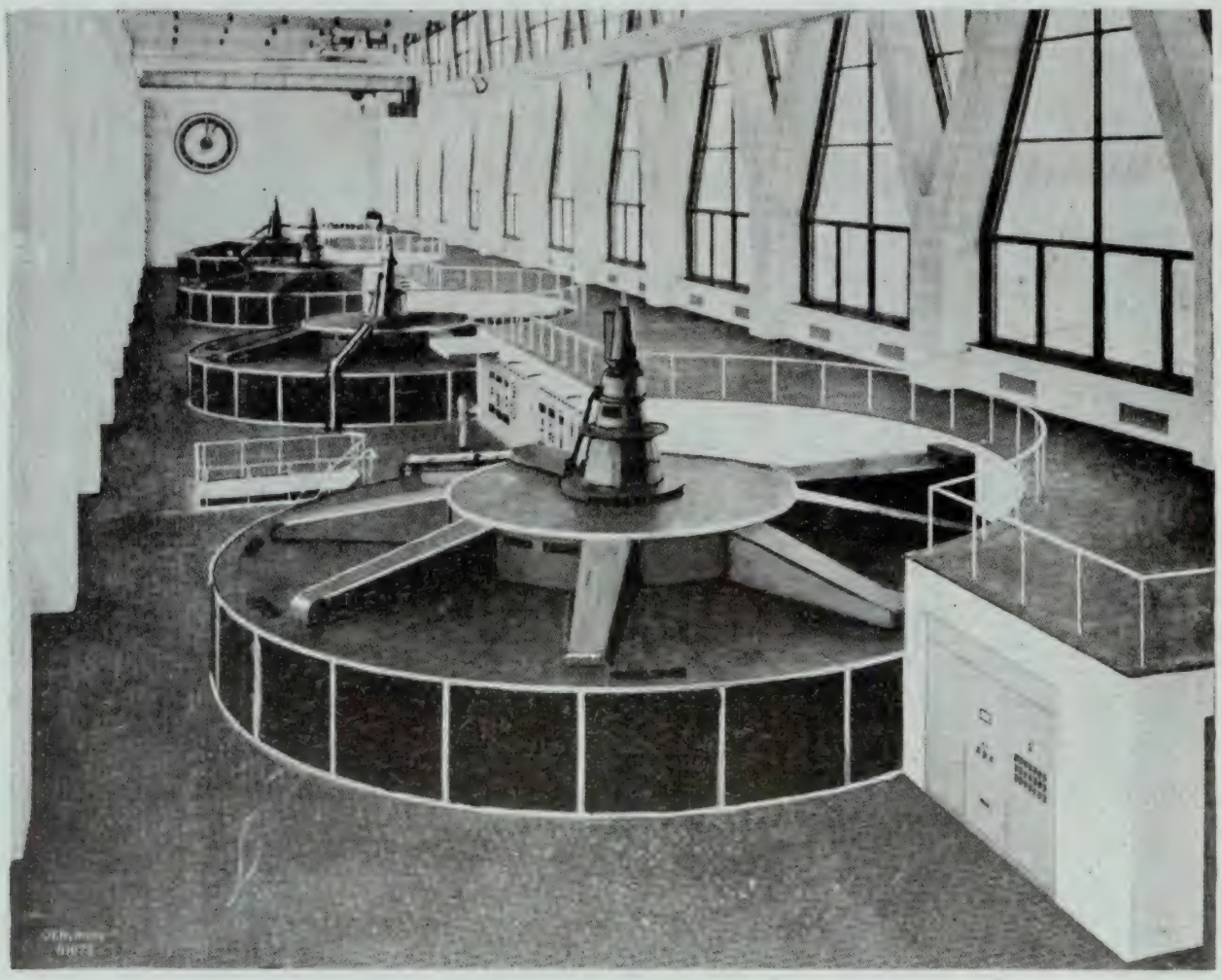
Rua Rodrigo da Fonseca, 103, r/c
LISBOA — Tel. 68 60 72

Rua Sá da Bandeira, 766-1.º E.
Tel. 2 48 18 — PORTO

Ateliers de Construction Oerlikon—Zurich 50

Alternadores accionados por turbinas hidráulicas, para todas as potências e condições de exploração, pequenas e grandes velocidades

Central hidroeléctrica de Birsfelden (Suíça), sobre o Reno. Alternadores de 26.000 kVA, cada um, 6.600 V, 68 rot/min, 50 Hz. Diâmetro: 14 metros



Representante para Portugal e Ultramar: **Sociedade Michaëlis de Vasconcellos, Lda.**

PORTO — P. da Liberdade, 114 LISBOA — Av. Marquês de Tomar, 94

TÉCNICA

CORPO REDATORIAL: J. M. VIEGAS GONÇALVES, A. ROMÃO DIAS, J. F. GOMES DE FINA, A. M. L. ESTEVES BRINCA

Ano XXXVIII — N.º 327 Abril de 1963

C. D. U. 378.144 : 62 : 338.984

A POLÍTICA DE FOMENTO E O ENSINO DA ENGENHARIA

ENG. DIPL. DOMINGOS MOURA
1.º Assistente do I. S. T.

Nos últimos tempos têm-se discutido, com um vigor a que não estamos habituados, os problemas do ensino em Portugal. A formação dos engenheiros, já abrangida na saudável crítica que na generalidade procurou julgar a eficiência do ensino, foi ainda dissecada durante o 1.º Congresso do Ensino de Engenharia, que se efectuou no Instituto Superior Técnico durante o passado mês de Novembro.

Para apreciar o valor dos cursos das nossas escolas técnicas de grau superior seria útil um conceito preciso do que se entende por *engenheiro* e por *engenharia*; mas perante a dificuldade da definição — que o fluir da realidade social permanentemente desactualizaria — parece mais fecunda a atitude pragmática de julgar os méritos do ensino da engenharia, ponderando a contribuição que os diplomados, por essas escolas, trazem ao progresso da sociedade portuguesa.

De facto, enquanto o centro de interesse do matemático é a estrutura lógica, o centro de interesse do engenheiro é a realização técnica. E sem afirmar que a escala do mérito das realizações técnicas seja sòmente definida pela utilidade social, esta utilidade é um dos critérios por onde é legítimo aferir o valor das obras que os técnicos realizam.

No mercado comum de produtos e de técnica para que se encaminha o espaço europeu, os técnicos hão-de ser avaliados pelas obras que forem capazes de realizar. É num clima de livre concorrência intelectual que se vão ordenar as categorias das escolas, a que hoje, com alguma arbitrariedade, ainda é fácil atribuir ou negar equivalências.

As escolas portuguesas serão procuradas se diplomarem engenheiros capazes de executar bem os trabalhos de engenharia. Acrescentemos outra importante razão de preferência: serão procuradas pelos estudantes portugueses se os habilitarem para enfrentar as questões técnicas que com mais probabilidade os técnicos portugueses irão encontrar.

Adquire assim um sentido preciso, o perguntar se a Universidade Portuguesa através das suas Escolas de Engenharia, corresponde actualmente ao que dela se deveria esperar.

São conhecidas as respostas que predominaram no Congresso do Ensino de Engenharia. Não se conhece ainda a redacção definitiva das conclusões do Congresso, mas julgam-se representativas as transcrições seguintes:

«Dos reduzidos efectivos escolares e dos precários métodos pedagógicos seguidos resulta uma generalizada carência de preparação do país, em todos os níveis, para o exercício de actividades profissionais, com o grau de competência exigido pela economia de hoje...»

E mais adiante:

«A realidade é que o nosso nível geral de tecnicidade, de baixo a cima, é ainda rudimentar, por muito que custe aos que se recusam a sair do passado e a entrar na aventura do homem de hoje». (Comunicação do Eng.º Manuel Rocha).

«.. para muitos — quase diria a maioria — a vida universitária constitui uma desilusão» (comunicação do Eng.º J. B. Romero).

«O facto de ter a convicção de que muito do que se faz no ensino superior de Engenharia está errado...». (Comunicação do Eng.º J. Cunha Serra).

Em quase todas as 55 comunicações apresentadas se repetiram gravíssimas críticas ao ensino, às quais se juntaram, durante as sessões do Congresso, as críticas — algumas bem dolorosas — dos próprios alunos.

Contudo, nem só de boas ou más escolas depende a eficiente acção do engenheiro: em Portugal há uma estrutura económica, social, financeira e profissional que dificulta a ideal utilização das possibilidades de progresso oferecidas pela técnica. A lei autoriza iguais responsabilidades técnicas a um aluno que acaba de concluir o curso e a um experiente engenheiro com anos de actividade na profissão. Deste simples facto, pode-se inferir como, do ambiente profissional, estarão ausentes quaisquer estímulos ao aperfeiçoamento.

Quando se pergunta se as Escolas de Engenharia têm correspondido ao que delas se deveria esperar, a Universidade pode responder: foi alguma vez indicado às escolas o sentido em que iria ser orientada a evolução da economia, assinalaram-se tempos e marcaram-se etapas no processo de desenvolvimento, deu-se-lhes alguma sugestão quanto à natureza das realizações técnicas que se previam para os decénios seguintes?

Se tais rumos alguma vez foram indicados — do que não há notícia — o que é certo é que a orientação do ensino, dos trabalhos de laboratório, dos projectos escolares e dos estágios, foi deixada à inspiração e boas intenções de cada professor, à sua visão mais ou menos polarizada dos problemas nacionais, à sua exacta ou falsa ideia dos caminhos por onde o mundo ia avançando.

Fundamentaram-se as reformas no ensino da engenharia nas realidades da vida económica portuguesa, no conteúdo concreto dos planos de fomento?

Infelizmente não existe sequer uma simples estatística da distribuição dos engenheiros pelas diferentes actividades, estatística que tão útil seria para a organização dos programas e orientação dos alunos que frequentam os últimos anos dos cursos.

É certo que, no domínio das ciências e das técnicas, o saber é mais o atingir determinada atitude mental do que acumular «receitas» na memória. É subir a plano superior e com a subida logo se domina extenso horizonte que, para quem ficou em plano mais baixo, obriga a longa e incerta exploração. Não é de facto característica da Universidade, a função estática de «depositária do saber» que pode definir uma instituição bibliotecária, mas nunca um grupo de homens que devem cultivar, no mais alto grau, uma atitude essencialmente crítica perante as provisórias verdades que as gerações anteriores lhes legaram. E o pragmático desvanecer da verdade absoluta a que, nos domínios da ciência, estamos a assistir, é paralelo com um caminhar para a abstracção.

Certo é, também, que esta tendência para a abstracção leva a esbaterem-se as especializações na formação básica do engenheiro. Em artigo publicado em Fevereiro de 1963, A. J. Ellison, do Queen Mary College de Londres, afirma que em algumas universidades americanas a tradicional separação entre os cursos de engenharia civil, mecânica, química ou electrotécnica está desaparecendo e os cursos estão a ser reagrupados sobre disciplinas básicas.

Perante esta tendência — indiscutível nas mais categorizadas escolas de engenharia — pode-se perguntar se a formação dos engenheiros deverá ser condicionada pelos problemas concretos que a vida real apresenta.

Não parece possível dar à pergunta duas respostas de sentido diferente: encaminhar os alunos-engenheiros para uma visão tão larga e completa quanto possível dos problemas que terão de resolver, dar-lhes esquemas lógicos muito amplos e por isso muito seguros, não significa que o objectivo essencial do ensino deixe de ser a realização técnica, a obra de engenharia. Ora é tão vasto o conhecimento científico actual que o ensino obriga a uma constante escolha: escolha dos domínios que se analisam, das grandezas que se relacionam, das leis que se aprofundam, das aplicações que constantemente devem acompanhar a teoria.

Na engenharia o abstracto não se opõe ao concreto antes o completa. Afirma Bertrand Schwartz

que a verdadeira cultura deve ser afinal um permutar constante, incessante, do abstracto e do concreto, da teoria e da prática, da informação e da reflexão.

É para esta necessária presença do concreto, da prática, de uma informação actual que o conhecimento dos destinos da economia parece indispensável, a quem tem de orientar a formação dos engenheiros.

Mas a necessidade de articular a política económica com o ensino da engenharia é ainda vantajosa para além do importante papel de influenciar os programas escolares.

O tema merece um comentário mais longo.

É banal dizer-se que o investimento em «matéria cinzenta» é de longe o mais rendoso investimento que se pode propor a um país pouco evoluído. E entre nós parece que modestos aumentos de dotações possibilitariam uma mudança radical nas condições do ensino da engenharia: distinção entre cursos de base que dariam o bacharelato e cursos mais avançados que dariam a licenciatura e o doutoramento, alteração da orgânica das escolas que permitisse um ajustamento constante à evolução do mundo técnico, aumento dos quadros docentes, colaboração activa dado por engenheiros que trabalhem na indústria, aprofundamento das técnicas de projecto e de ensaio, intenso intercâmbio de alunos e professores com escolas estrangeiras, difusão de revistas e de outra literatura técnica através de centros de informação bibliográfica, trabalho autónomo dos alunos mais interessados, cursos de actualização a horas compatíveis com os horários de trabalho dos engenheiros, maciça participação nas reuniões científicas significativas.

Mas uma decidida vontade de viver — e não de apenas vegetar — nesta segunda metade do século XX levaria a duas coisas um pouco mais caras: investigação integrada na Universidade e bolsas de estudo que permitissem seleccionar as elites pelo seu valor intelectual e entre todos os portugueses.

Sem investigação, sem uma permanente reflexão sobre o conhecimento, a Universidade estiola-se numa mecânica transmissão de informações, abdica da inquieta atitude crítica que é própria do verdadeiro saber e predispõe-se a servir todos os dogmatismos.

Entre nós, e nos domínios que interessariam à Engenharia, é difícil empreender programas de investigação pura. A investigação pura exige um pesado investimento por prazo indefinido e dificilmente se manterá, desligada de uma forte estrutura industrial que a estimule, financie e ràpidamente tire proveito dos resultados obtidos. Fora deste quadro a investigação pura pode aqui e ali viver de dedicações desinteressadas mas o fenómeno é pouco frequente e demasiado aleatório para se considerar um caminho com interesse imediato.

Dizer que se deve fazer investigação aplicada ainda é vago. A ideia ganha em precisão quando se afirma que a investigação aplicada se deverá centrar nos problemas que interessam ao desenvolvimento económico português. Interessa ao desenvolvimento económico português não só que passem a fabricar-se em Portugal bens de consumo e equipamentos que têm estado a ser importados, mas também que se exportem bens de consumo, equipamentos e serviços técnicos.

Neste aspecto é, não só possível, mas necessário que as Escolas Superiores dêm o impulso inicial. Parece urgente que, nas nossas Escolas de Engenharia, se organizem Centros de Investigação Aplicada, se realizem cursos livres sobre técnicas novas, se dê todo o possível auxílio aos industriais que ultrapassem a rotina habitual. Foi opinião predominante durante o Congresso de Ensino da Engenharia ser necessário um larguíssimo e permanente contacto entre as Escolas e a Indústria. Mas as Escolas, a quem cabe fixar os rumos dos seus cursos mais avançados e dos seus centros de investigação aplicada, precisam de conhecer a orientação da economia. O articular o ensino da engenharia com a política económica volta a mostrar-se indispensável e urgente.

As economias fortemente industrializadas que hoje repartem entre si o domínio do mundo, nasceram de um silencioso mas persistente trabalho de gerações que teceram uma densa estrutura técnica onde se apoiam as iniciativas que em novas sínteses combinam processos já dominados. Construir edifícios, importar máquinas, mobilizar dinheiros são aspectos circunstanciais da industrialização, que oportuna e naturalmente se processam quando é transbordante de possibilidades o trabalho dos cientistas e dos técnicos.

Sem o apoio de uma eficiente estrutura do ensino é ilusório o sucesso de qualquer planeamento de progresso económico e promoção social. Já em 1881 Eça de Queirós se referia em termos esclarecedores aos resultados da industrialização do Egipto, sonhada nos fins do século XIX, pelo Khediva Ismail-Pachá:

«Em que gastou Ismail-Pachá esses centenares de milhões que a Europa lhe emprestou, e que o pobre felá está pagando? Em primeiro lugar, na realização de uma ideia económica — o converter o Egipto que é um país agrícola, numa nação industrial. O Egipto produzia o açúcar, porque o não refinaria? Possuía o algodão — porque o não teceria? E aí começou à força de milhões, a cobrir as margens do Nilo dessas colossais fábricas, de que hoje só restam ruínas, ... » (Eça de Queirós, *Cartas de Inglaterra*).

Não se esquece serem múltiplos os parâmetros a alterar para fazer subir os índices gémeos de baixo nível de vida e baixa tècnicidade. Mas devemos ter a consciência de que o estar na Europa em contacto fácil com as fontes do pensamento científico e ao mesmo tempo o ter um modesto nível de vida, são factores que nos podem favorecer num início de exportação de serviços e produtos técnicos. Para isso é essencial que um maciço investimento no ensino nos permita tirar proveito do apreciável fundo de cultura científica de que dispomos.

Temos até aqui reflectido sobre o ensino universitário da engenharia à luz de critérios de utilidade e rendimento. Contudo não desejaríamos concluir estas notas sem nos associarmos a uma esperança mais ampla e fundamental com que é legítimo olhar a Universidade.

De facto, é própria do poder político a tentação de apresentar como verdade definitiva aquilo que não passa de compromisso entre as tensões que solicitam o executivo. Vemos sucederem-se diferentes «verdades» ao ritmo imposto pela mutável expressão dos condicionamentos sociais e económicos. E para impor a sua verdade tem o Estado moderno o tremendo poder de orientar econòmicamente as escolhas do homem através das macro-decisões da planificação. Destas premissas conclui o Prof. Paul Ricoeur que o indispensável equilíbrio de poderes exige a formação independente e esclarecida da opinião pública.

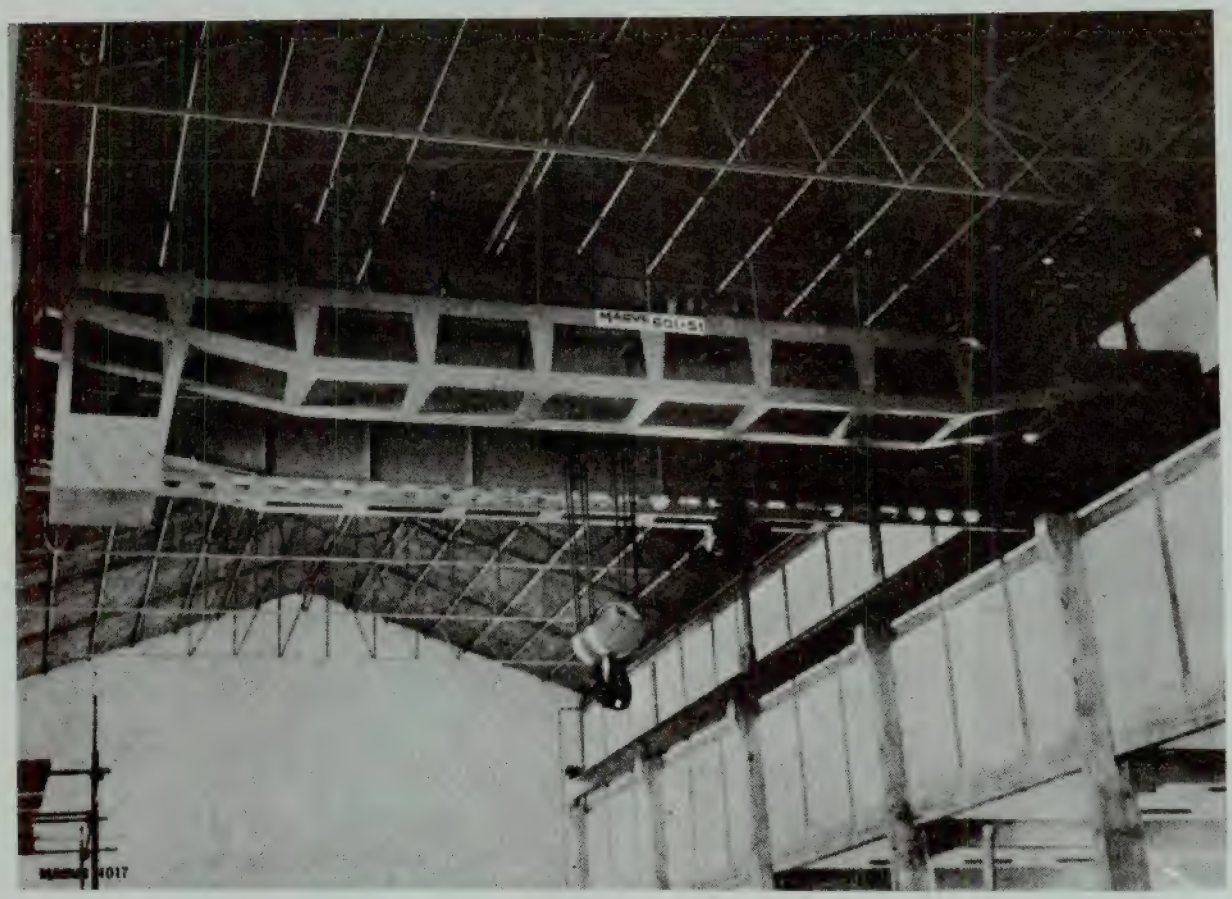
É essa formação esclarecida da opinião que devemos ir buscar à Universidade, para ser consciente a nossa valorização no mundo em que vivemos: mundo em que alguns teimam em ver um melancólico amontoado de destroços mas em que tantos põem a esperança de melhor justiça e mais caridade.

MAGUE

CONSTRUÇÕES METALO-MECÂNICAS MAGUE, L.DA

(S. E. MONIZ DA MAIA & VAZ GUEDES, L.DA)

Alverca — Portugal

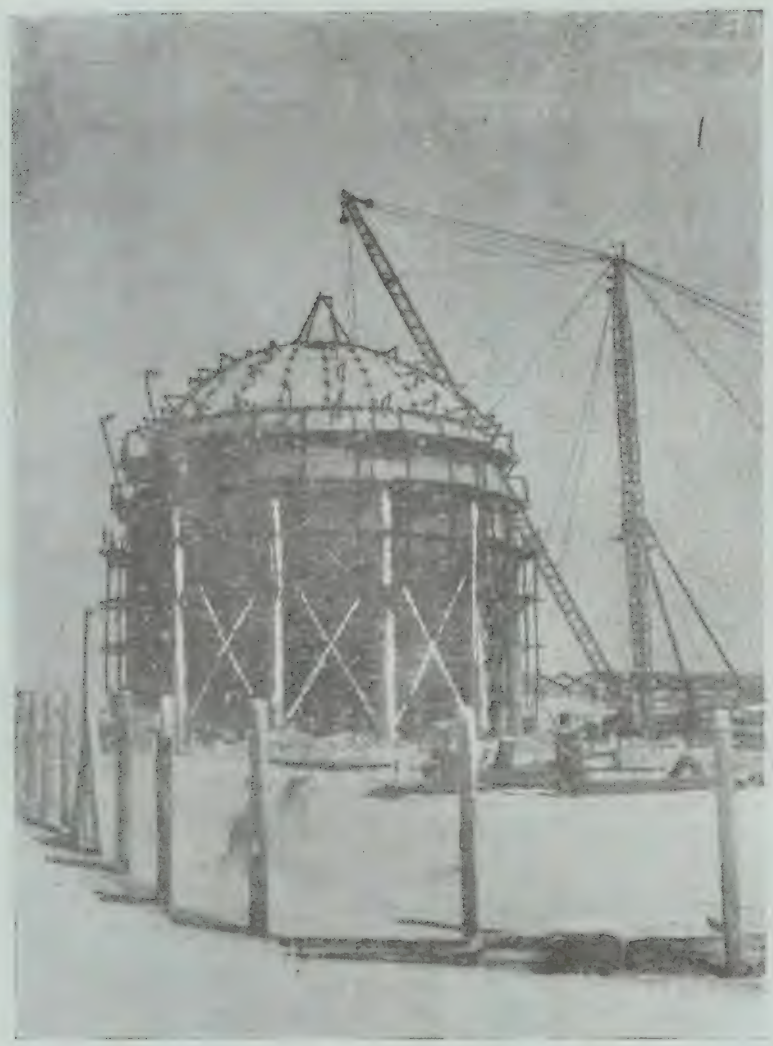


Ponte rolante, eléctrica, de 60 t–5 t/17 m, em funcionamento na fábrica de Equipamentos Eléctricos S. A. R. L. (MOTRA)

•

PROJECTO E FABRICO DE

PONTES ROLANTES
GUINDASTES
GRUAS. DERRICKS E GUINCHOS
APARELHOS DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS
CONSTRUÇÕES METÁLICAS PESADAS



ESFERA

PARA

ARMAZENAGEM

DE

AMONÍACO

AÇOS VAZADOS • FERROS FUNDIDOS
MECÂNICA MÉDIA E PESADA
CONSTRUÇÕES METÁLICAS

comportas
turbinas
condutas forçadas
reservatórios sob pressão
permutadores de calor

REDUTORES DE VELOCIDADE

DIVISÃO METALO-MECÂNICA

COMPANHIA UNIÃO FABRIL

AV. 24 DE JULHO, 170 — LISBOA 2 — TELEFONES 67 04 21 E 67 20 61 — TELEGRAMAS: METALOFABRIL

C. D. U. 621.313.322-81 : 621.316.717

Arranque Síncrono de Turbo-Alternadores

POR CARLOS FERRER MONCADA
Doutor-Engenheiro E. T. H. (Zürich)
Professor do Instituto Superior Técnico

PREFÁCIO

O presente trabalho diz respeito a estudos e ensaios sobre dois turbo-alternadores, cada um com a potência nominal de 18.900 KVA e tensão de 10.500 V, pertencentes à Central Tejo das Companhias Reunidas Gás e Electricidade que antevêem a possibilidade de as referidas máquinas poderem vir a funcionar como compensadores síncronos e assim se interessam pelo decorrer do seu arranque por aumento de frequência.

São examinadas as condições convenientes para a realização prática do arranque suave, por aumento de frequência, duma das máquinas funcionando como motor quando ligada através do seu barramento de alta tensão à outra máquina funcionando como gerador e lançada lentamente pela respectiva turbina a vapor.

O trabalho presente consta de duas partes. A primeira parte ocupa-se da Estrutura Teórica e da sua aplicação a dois turbo-alternadores da Central Tejo, a segunda parte trata da apresentação e apreciação de oscilogramas sobre o arranque síncrono dos mesmos turbo-alternadores.

O meu antigo Assistente Engenheiro Abreu Faro prestou-me assistência eficiente durante os ensaios que realizei na Central Tejo.

Ao Engenheiro-Chefe Mariz Simões e aos seus colaboradores Engenheiro Gomes Álvares e Engenheiro Machado da Assunção agradeço as atenções que nos dispensaram durante o decorrer dos referidos ensaios.

Constitui para mim um dever agradável testemunhar neste lugar a minha gratidão ao Engenheiro-Chefe Mariz Simões pela elevação com que me concedeu, na Central Tejo, todas as facilidades para a realização destes ensaios.

Agradeço à Direcção das Companhias Reunidas Gás e Electricidade a atenção que teve em concordar com a publicação dos ensaios realizados na Central Tejo.

A. ESTRUTURA TEÓRICA E SUA APLICAÇÃO

PLANO GERAL

I — BASES TEÓRICAS FUNDAMENTAIS

1. — Introdução
2. — Relações de valores instantâneos e estados estacionários
3. — Momento do binário e condições favoráveis de arranque

II — DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DE CONCORDÂNCIA DOS DOIS ROTORES

1. — Definições e convenções adotadas
2. — Determinação da posição de coincidência dos eixos magnéticos
3. — Dispositivo de leitura da posição relativa dos dois rotores

III — DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DO GERADOR E DO MOTOR

IV — APLICAÇÃO DA TEORIA EXPOSTA A DOIS TURBO-ALTERNADORES DA CENTRAL TEJO CADA UM COM A POTÊNCIA NOMINAL DE 18 900 KVA

1 — Constantes e características das máquinas
2 — Estudo e realização prática do arranque síncrono
3 — Regime estacionário e diagrama vectorial para n = 150 r.p.m.
4 — Variação da desfasagem interna φ_0 e sua influência no arranque.

I — BASES TEÓRICAS FUNDAMENTAIS

1. — *Introdução*

A estrutura teórica que vamos estabelecer diz respeito ao funcionamento de duas máquinas síncronas, trifásicas, simétricas, de rotor cilíndrico, bipolares e ligadas entre si segundo o esquema da Fig. 1, em que a máquina G, accionada por uma turbina a vapor, funciona como gerador fornecendo à máquina M a energia necessária para o seu funcionamento como motor.

temente grande para na parte inicial da sua primeira volta arrastar no seu movimento o rotor do motor excitado pela corrente I_{Rm}.

A velocidade angular do rotor do gerador, accionado pela turbina a vapor e travado pelo atrito e pelo binário electrodinâmico devido às próprias correntes induzidas, vai crescendo e condicionando o aumento de frequência e de amplitude das forças electromotrizes induzidas nos circuitos do estator. As duas máquinas podem entrar em sincronismo e acompanharem-se até à frequência nominal. Este processo do arran-

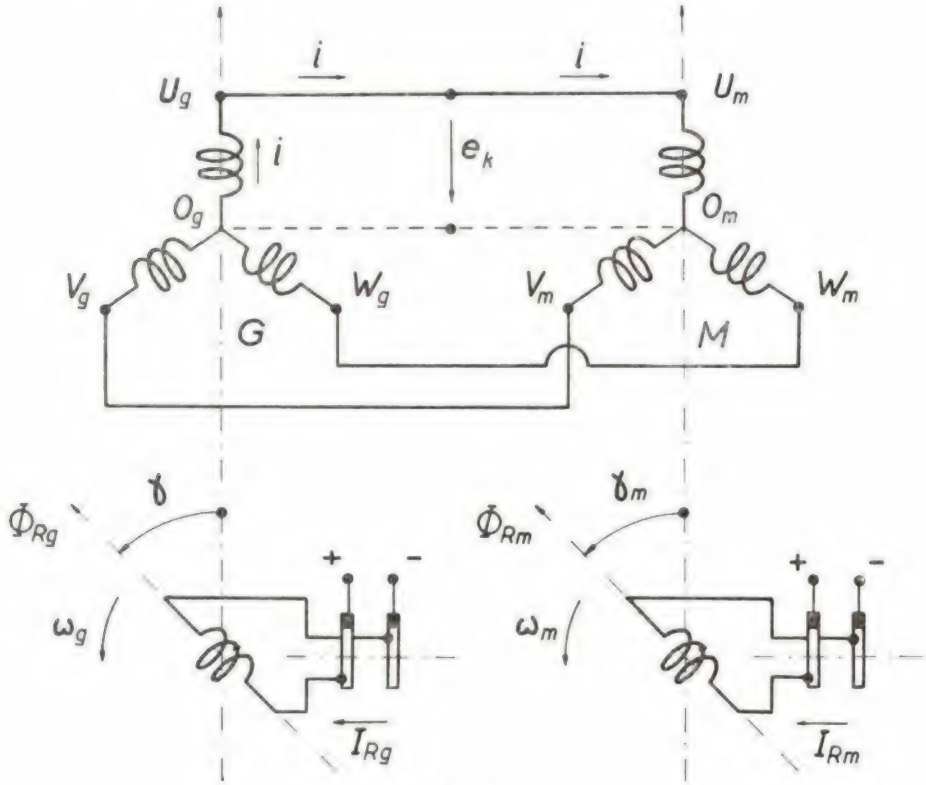


Fig. 1

Consideramos ligadas as correntes contínuas I_{Rg} e I_{Rm} de excitação dos rotores por fontes independentes. O rotor da máquina G é accionado por uma turbina a vapor, e o seu estator está ligado ao estator da máquina M de maneira a poder fornecer-lhe a energia necessária para que se dê o arranque suave do seu rotor.

A turbina a vapor deve arrancar lentamente de maneira que o rotor do gerador induza no estator forças electromotrizes que dêem lugar a correntes que circulando através das fases do motor produzam um campo girante rodando também lentamente com uma amplitude suficien-

que suave do motor constitui o «arranque síncrono» por aumento de frequência que cresce até à frequência nominal.

As condições a observar para conseguir com êxito este arranque suave, dizem respeito à escolha das excitações dos rotores, correntes I_{Rg} e I_{Rm}, e á escolha da posição relativa inicial dos mesmos rotores.

A teoria que vamos expor informará sobre os pontos de vista a observar para proceder a esta escolha e fornecerá elementos para apreciar os fenómenos que se desencadeiam durante os primeiros segundos do arranque.

As fotografias apresentadas nas Figs. 6 e 8 são devidas à iniciativa do Eng.º Chefe Mariz Simões, que amàvelmente nos surpreendeu, entregando-nos as respectivas cópias.

Como sistema de unidades adotamos, neste trabalho, o sistema prático electromagnético.

2. — *Relações de valores instantâneos e estados estacionários*

Notações gerais segundo o esquema da Fig. 1.

R_g resistência de uma fase do gerador

R_m resistência de uma fase do motor

$L_{\Delta g}$ coeficiente de indução trifásica de uma fase do estator do gerador

$L_{\Delta m}$ coeficiente de indução trifásica de uma fase do estator do motor

ω_g velocidade angular do rotor bipolar do gerador

ω_m velocidade angular do rotor bipolar do motor

ω_s pulsação síncrona correspondente a $f = 50$ c/seg

n_g número de rotações por minuto do gerador

n_m número de rotações por minuto do motor

n_s número de rotações síncronas por minuto correspondente a $f = 50$ c/seg

$X_g = \omega_s L_{\Delta g}$ reactância trifásica síncrona, para $f = 50$ c/seg, do gerador

$X_g = \omega_s L_{\Delta m}$ reactância trifásica síncrona, para $f = 50$ c/seg, do motor

e_g valor instantâneo da f. e. m. induzida pelo rotor na fase $O_g \rightarrow U_g$ do gerador

e_m valor instantâneo da f. e. m. induzida pelo rotor na fase $O_m \rightarrow U_m$ do motor

i valor instantâneo da corrente na fase U do estator

e_k valor instantâneo da tensão nos terminais na fase U do estator

I_{Rg} corrente contínua de excitação do rotor do gerador

I_{Rm} corrente contínua de excitação do rotor do motor.

Desprezamos a saturação dos circuitos magnéticos das máquinas e consideramos portanto os coeficientes de indução como constantes.

Da aplicação das leis fundamentais do electromagnetismo aos circuitos da fase U do estator, segundo o esquema de ligações da Fig. 1 em que se encontram indicados os sinais tomados como positivos para a tensão nos terminais e_k e corrente i, resultam as seguintes relações de valores instantâneos:

$$e_k = e_g - iR_g - L_{\Delta g}\frac{di}{dt} \tag{1}$$

$$e_k = e_m + iR_m + L_{\Delta m}\frac{di}{dt} \tag{2}$$

Das relações (1) e (2) resulta:

$$i(R_g + R_m) + (L_{\Delta g} + L_{\Delta m})\frac{di}{dt} = e_g - e_m \tag{3}$$

ou

$$iR + L_\Delta \frac{di}{dt} = e_g - e_m \tag{4}$$

em que se adoptaram as seguintes notações

$$\left\{\begin{array}{l} R = R_g + R_m \\ L_\Delta = L_{\Delta g} + L_{\Delta m} \end{array}\right. . \tag{5}$$

No caso particular de considerarmos duas máquinas com constantes iguais, resultam de (5) as seguintes relações

$$\left\{\begin{array}{l} R_g = R_m = \dfrac{R}{2} \\ L_{\Delta g} = L_{\Delta m} = \dfrac{L_\Delta}{2} \end{array}\right. . \tag{5a}$$

De (1), (2) e (5a) resulta a expressão

$$e_k = \frac{e_g + e_m}{2} . \tag{4a}$$

A corrente i no estator terá uma forma condicionada pela relação (4) de maneira a que a soma das quedas de tensão ohmica e indutiva no circuito seja sempre igual à diferença das forças electromotrizes $(e_g - e_m)$.

A relação (4a) exprime que a tensão nos terminais e_k é igual à semi-soma das forças electromotrizes e_g e e_m.

Na teoria que se segue só consideramos as forças electromotrizes e_g e e_m induzidas pelos fluxos das correntes contínuas de excitação dos rotores e admitimos que são sinusoidais respectivamente de frequências angulares ω_g e ω_m. Supondo ainda que R e L_Δ são constantes, conclui-se da relação (4) que a corrente i, em regimen forçado, contém unicamente as frequências ω_g e ω_m.

Passamos agora ao estudo de estados estacionários a partir das equações de valores instantâneos já obtidas.

O valor eficaz da força electromotriz sinusoidal induzida pelo rotor numa fase do estator, para uma determinada corrente de excitação, é proporcional ao número de rotações por minuto do mesmo rotor. Designando assim por E_g e E_m respectivamente o valor eficaz da força electromotriz do gerador e do motor correspondentes às excitações I_{Rg} e I_{Rm} e ao número de rotações síncronas por minuto n_s, concluímos que os seus valores eficazes En_g e En_m, correspondentes ao número de rotações n_g e n_m, serão dados pelas expressões:

$$(6)\qquad \begin{cases} En_g = E_g \dfrac{n_g}{n_s} \\[2ex] En_m = E_m \dfrac{n_m}{n_s}. \end{cases}$$

A expressão das forças electromotrizes e_g e e_m em notação simbólica, será então:

$$7)\qquad \begin{cases} e_g = \sqrt{2}\ E_g \dfrac{n_g}{n_s} \varepsilon^{j\gamma_g} \varepsilon^{j\omega_g t} = \sqrt{2}\ \dot{E}_g \dfrac{n_g}{n_s} \varepsilon^{j\omega_g t} \\[2ex] e_m = \sqrt{2}\ E_m \dfrac{n_m}{n_s} \varepsilon^{j\gamma_m} \varepsilon^{j\omega_m t} = \sqrt{2}\ \dot{E}_m \dfrac{n_m}{n_s} \varepsilon^{j\omega_m t} \end{cases}$$

em que ω_g e ω_m representam as respectivas pulsações ou frequências angulares, γ_g e γ_m as suas desfasagens em relação à origem dos tempos e

$$(7a)\qquad \begin{cases} \sqrt{2}\ \dot{E}_g \dfrac{n_g}{n_s} = \sqrt{2}\ E_g \dfrac{n_g}{n_s} \varepsilon^{j\gamma_g} \\[2ex] \sqrt{2}\ \dot{E}_m \dfrac{n_m}{n_s} = \sqrt{2}\ E_m \dfrac{n_m}{n_s} \varepsilon^{j\gamma_m} \end{cases}$$

as respectivas amplitudes complexas.

Das relações (7) e (4) resulta a expressão

$$(8)\qquad \begin{aligned} & i R + L_\Delta \frac{di}{dt} = \\ & = \sqrt{2} \left[\dot{E}_g \frac{n_g}{n_s} \varepsilon^{j\omega_g t} - \dot{E}_m \frac{n_m}{n_s} \varepsilon^{j\omega_m t} \right] \end{aligned}$$

donde se conclui que a corrente forçada i terá a expressão

$$(9)\qquad i = \sqrt{2}\ (\dot{I}_g \varepsilon^{j\omega_g t} - \dot{I}_m \varepsilon^{j\omega_m t})$$

em que têm lugar as relações:

$$(10)\qquad \begin{cases} \dot{I}_g = \dfrac{\dot{E}_g \dfrac{n}{n_s}}{R + j\omega_g L_\Delta} \\[3ex] \dot{I}_m = \dfrac{\dot{E}_m \dfrac{n_m}{n_s}}{R + j\omega_m L_\Delta} \end{cases}$$

As relações (9) e (10) exprimem que a corrente i por fase pode considerar-se composta de duas correntes em geral de frequências diferentes ω_g e ω_m e de amplitudes I_g e I_m. Estas amplitudes dependem das excitações através de E_g e E_m e das velocidades angulares dos rotores.

Designando a reactância síncrona de cada máquina respectivamente por

$$X_g = \omega_s L_{\Delta g} \quad \text{e} \quad X_m = \omega_s L_{\Delta m}\ ,$$

a sua soma por

$$X = X_g + X_m$$

e atendendo á relação (5) teremos:

$$(11)\qquad X = \omega_s (L_{\Delta g} + L_{\Delta m}) = \omega_s L_\Delta .$$

Atendendo à relação (11) podemos escrever as relações (10) da seguinte forma:

$$(12)\qquad \begin{cases} \dot{I}_g = \dfrac{\dot{E}_g \dfrac{n_g}{n_s}}{R + jX \dfrac{n_g}{n_s}} \\[3ex] \dot{I}_m = \dfrac{\dot{E}_m \dfrac{n_m}{n_s}}{R + jX \dfrac{n_m}{n_s}} \end{cases}$$

No caso particular de as máquinas rodarem com a mesma velocidade angular teremos:

$$(13)\qquad \begin{aligned} \omega_g &= \omega_m = \omega \\ n_g &= n_m = n \end{aligned}$$

e as relações (7) tomam a forma

$$(14)\qquad \begin{cases} e_g = \sqrt{2}\ \dot{E}_g \dfrac{n}{n_s} \varepsilon^{j\omega t} \\[2ex] e_m = \sqrt{2}\ \dot{E}_m \dfrac{n}{n_s} \varepsilon^{j\omega t} \end{cases}$$

Das relações (4) e (14) resulta a relação

$$(15) \qquad i R + L_\Delta \frac{di}{dt} = \sqrt{2}\, \frac{n}{n_s} (\dot{E}_g - \dot{E}_m)\, \varepsilon^{j\omega t}$$

donde se conclui que, neste caso, a corrente será também sinusoidal e terá a expressão

$$(16) \qquad i = \sqrt{2}\, \dot{I}\, \varepsilon^{j\omega t}$$

em que tem lugar a relação

$$(17) \qquad \dot{I} = I\, \varepsilon^{j\eta}$$

onde I representa o seu valor eficaz e η a sua desfasagem em relação à origem dos tempos.

Das relações (15), (16) e (11) resulta a relação vectorial em notação simbólica:

$$(18) \qquad \left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s} = \dot{I}\, \dot{R} + j\, \dot{I}\, X\, \frac{n}{n_s}$$

donde se obtêm as seguintes expressões:

$$(19) \qquad \dot{I} = \frac{\left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s}}{R + j\, X\, \frac{n}{n_s}}$$

$$(19a) \qquad \operatorname{tg} \varphi_o = \frac{X}{R}\, \frac{n}{n_s} = \left(\frac{X}{R\, n_s}\right) . n$$

em que φ_o representa a desfasagem entre a corrente $\dot{I}$ e a f. e. m. $\left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s}$. Designaremos esta desfasagem φ_o por desfasagem interna do circuito.

É de notar que a grandeza tg φ_o é proporcional ao número de rotações por minuto n.

Das relações (1), (2), (14) e (16) conclui-se que a tensão nos terminais e_k é também sinusoidal e pode exprimir-se pela relação

$$(20) \qquad e_k = \sqrt{2}\, E_k\, \varepsilon^{j\eta_k}\, \varepsilon^{j\omega t} = \sqrt{2}\, \dot{E}_k\, \varepsilon^{j\omega t}$$

em que E_k representa o valor eficaz de tensão nos terminais, de frequência ω, correspondente ao número de rotações por minuto $n = n_g = n_m$.

Atendendo às relações (11), (14), (16) e (20) obtêm-se, a partir das expressões fundamentais (1) e (2), as seguintes relações vectoriais para a tensão nos terminais $\dot{E}_k$

$$(21) \qquad \begin{cases} \dot{E}_k = \frac{n}{n_s}\, \dot{E}_g - \dot{I}\, R_g - j\, \dot{I}\, \frac{n}{n_s}\, X_g \\ \dot{E}_k = \frac{n}{n_s}\, \dot{E}_m + \dot{I}\, R_m + j\, \dot{I}\, \frac{n}{n_s}\, X_m \end{cases}$$

No caso particular de considerarmos duas máquinas com constantes iguais segundo as relações (5a), obtêm-se a partir de (21) as seguintes relações vectoriais:

$$(21a) \qquad \dot{E}_k = \frac{1}{2} \left(\dot{E}g + \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s}$$

$$(21b) \qquad \dot{I}\, \frac{R}{2} + j\, \dot{I}\, \frac{n}{n_s}\, \frac{X}{2} = \frac{1}{2} \left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s} .$$

A relação (21a) representa a tensão nos terminais $\dot{E}_k$ correspondente ao número de rotações n em função das f. e. m. $\dot{E}_g$ e $\dot{E}_m$ relativas ao número de rotações n_s.

Consideramos ainda dois casos limites da expressão (19).

1.º Caso —

Para $n << n_s$ e consequentemente $X \frac{n}{n_s} << R$ obtém-se a partir de (19) e, desprezando $X \frac{n}{n_s}$ em relação a R, a seguinte expressão para a corrente

$$(22) \qquad \dot{I} = \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m)}{R}\, \frac{n}{n_s}$$

Nestas condições a corrente está em fase com a f. e. m. resultante $(\dot{E}_g - \dot{E}_m)$, isto é, $\operatorname{tg} \varphi_o = 0$ e a sua amplitude é proporcional ao número n de rotações por minuto.

2.º Caso —

Para $X \frac{n}{n_s} >> R$ podemos desprezar na expressão (19) a grandeza R em relação a $X \frac{n}{n_s}$ o que conduz à expressão

$$(23) \qquad \dot{I} = \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m)\, \frac{n}{n_s}}{j\, X\, \frac{n}{n_s}} = - j\, \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m)}{X}$$

Da expressão (23) conclui-se que a amplitude da corrente, neste caso limite, é independente do número n de rotações por minuto, isto é,

independente da velocidade comum das máquinas. A mesma corrente $\dot{I}$ encontra-se em atraso de $\frac{\pi}{2}$ em relação à força electromotriz resultante $(\dot{E}_g - \dot{E}_m)$.

A amplitude da corrente neste caso, só depende de $|\dot{E}_g - \dot{E}_m|$ (valor síncrono) que por sua vez depende de E_g e de E_m e da sua desfasagem relativa, isto é, do ângulo α entre os dois rotores.

3. — *Momento do binário e condições favoráveis de arranque*

O momento do binário electrodinâmico da máquina síncrona, trifásica, simétrica e funcionando como motor é dado pela expressão

$$(24) \qquad M = \frac{3}{2\pi \frac{n}{60}} \cdot \frac{n}{n_s} E_m . I . \cos \delta$$

em que δ representa o ângulo de desfasagem entre a f. e. m. $\dot{E}_m$ e a corrente $\dot{I}$.

Designando por ψ_{Sm} o valor eficaz do fluxo magnético ligado duma fase do estator e originado pelas correntes de todas as fases do estator e por ψ_{Rm} o valor eficaz do fluxo ligado com a mesma fase do estator e originado pela corrente de excitação do rotor, obtém-se a partir da relação (24), ou directamente a partir da energia magnética da máquina, a seguinte expressão para o momento

$$(25) \qquad M = p . \frac{3}{l_{SS\Delta}} \psi_{Sm} . \psi_{Rm} . \sin \beta$$

em que β representa o ângulo de desfasagem no tempo entre os dois fluxos, tendo lugar a relação $\sin \beta = \cos \delta$. A grandeza $l_{SS\Delta}$ representa o coeficiente de indução trifásica de uma fase do estator relativo ao fluxo ligado e p o número de pares de polos da máquina.

Como no caso presente se trata duma máquina bipolar resulta de (25) a seguinte expressão para o momento

$$(25a) \qquad M = \frac{3}{l_{SS\Delta}} \psi_{Sm} . \psi_{Rm} . \sin \beta$$

Notamos que o valor do fluxo magnético girante $\psi_{Sm\Delta}$, originado pelas correntes de todas as fases do estator é igual a $\sqrt{2} . \psi_{Sm}$ e que o valor do fluxo magnético girante $\psi_{Rm\Delta}$ originado pela corrente de excitação do rotor actuando sobre o estator é igual a $\sqrt{2} . \psi_{Rm}$.

No caso presente da máquina bipolar o ângulo β de desfasagem no tempo entre ψ_{Sm} e ψ_{Rm} é igual ao ângulo de desfasagem no espaço entre os dois fluxos magnéticos girantes $\psi_{Sm\Delta}$ e $\psi_{Rm\Delta}$.

Tomando em conta estas considerações obtemos a partir da relação (25a) a seguinte expressão para o momento da máquina bipolar

$$(25b) \qquad M = \frac{3}{2} \frac{1}{l_{SS\Delta}} \psi_{Sm\Delta} . \psi_{Rm\Delta} . \sin \beta$$

Admitindo que, nos primeiros momentos depois do arranque suave do motor, tem lugar a relação $n_m = n_g = n << n_s$ e consequentemente $X \frac{n}{n_s} << R$, somos levados a concluir que a corrente $\dot{I}$ terá aproximadamente a expressão (22)

$$(22) \qquad \dot{I} = \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m) \frac{n}{n_s}}{R}$$

e estará portanto em fase com $(\dot{E}_g - \dot{E}_m)$.

Da expressão (24) conclui-se que, para determinados valores de E_m e de I o momento será máximo quando for $\delta = 0$, isto é, quando a corrente $\dot{I}$ estiver em fase com $\dot{E}_m$.

Para que esta condição, $\delta = 0$, seja compatível com a relação (22) é necessário que $\dot{E}_g$ esteja em fase com $\dot{E}_m$ e que o módulo de $\dot{E}_g$ seja superior ao módulo de E_m.

A igualdade de fase entre $\dot{E}_g$ e $\dot{E}_m$ acarreta a igualdade de fase entre os fluxos ψ_{Rg} e ψ_{Rm}, o que significa concordância dos eixos magnéticos dos dois rotores. Em virtude de o arranque do motor só ter lugar depois de o gerador entrar em movimento, conclui-se que, para tornar possível a passagem dos rotores pela referida concordância, é necessário colocar inicialmente o eixo magnético do rotor do motor com um avanço adequado, σ_0, em relação ao eixo magnético do rotor do gerador.

A partir das relações (22) e (24) obtém-se a expressão do momento para $\delta = 0$

$$(26) \qquad M_{\delta=0} = \frac{3}{2\pi \frac{n}{60}} \left(\frac{n}{n_s}\right)^2 \frac{E_m (E_g - E_m)}{R}$$

Para um determinado valor de n tiram-se da expressão (26) as seguintes conclusões.

Convém que a resistência total R seja pequena para obter um elevado momento de arranque.

Para um determinado valor de R e da força electromotriz E_g, o momento $M_{\delta=0}$ será máximo quando se der a igualdade

$$E_m = \frac{E_g}{2} \tag{27}$$

que introduzida na relação (26) conduz à expressão

$$(M_{\delta=0})_{max.} = \frac{3}{2\pi \frac{n}{60}} \left(\frac{n}{n_s}\right)^2 \frac{\left(\frac{E_g}{2}\right)^2}{R}. \tag{28}$$

Desprezando a saturação magnética das máquinas concluímos da relação (27) que, para obter boas condições de arranque do motor, a sua corrente de excitação deve ser igual a metade do valor da corrente de excitação do gerador. Nestas condições a relação (28) exprime que o momento é proporcional ao quadrado de E_g e portanto para aumentar o valor deste momento somos forçados a aumentar a corrente de excitação do gerador, mantendo a relação $E_m = \frac{E_g}{2}$.

CONCLUSÃO

Do que fica exposto extraiem-se as condições favoráveis de arranque do motor.

— A corrente I_{Rm} de excitação do motor deve ser igual a metade do valor da corrente I_{Rg} de excitação do gerador.

— A corrente I_{Rg} de excitação do gerador deve ser o maior possível.

— A resistência R, por fase, dos circuitos do estator deve ser o menor possível.

— O rotor do motor deve estar inicialmente em avanço dum ângulo α_0 em relação ao rotor do gerador.

— A turbina a vapor que acciona o gerador deve arrancar lentamente.

II — DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DE CONCORDÂNCIA DOS DOIS ROTORES

1. — *Definições e convenções adoptadas*

Tomamos em cada uma das máquinas o eixo magnético da «fase encarnada», fase U do estator, como referencial para a marcação da posição do eixo magnético do rotor. Fixamos como sentido dos avanços dos eixos magnéticos dos rotores, representados respectivamente por Φ_{Rg} e Φ_{Rm}, (Fig. 2), em relação à fase *U* do estator, o sentido comum de rotação das máquinas.

De acordo com o esquema de ligações relativo ao funcionamento das máquinas (Fig 1) estabelecemos o diagrama vectorial (Fig. 2) com as seguintes notações:

γ_0 → desfasagem inicial do rotor do gerador em relação à fase *U*;

γ_{om} → desfasagem inicial do rotor do motor em relação à fase *U*;

α_0 → desfasagem inicial entre o rotor do motor e o rotor do gerador.

Do que fica exposto tiram-se as seguintes conclusões:

A desfasagem inicial α_0 entre os dois rotores é expressa pela relação

$$\alpha_0 = \gamma_{om} - \gamma_0 ;$$

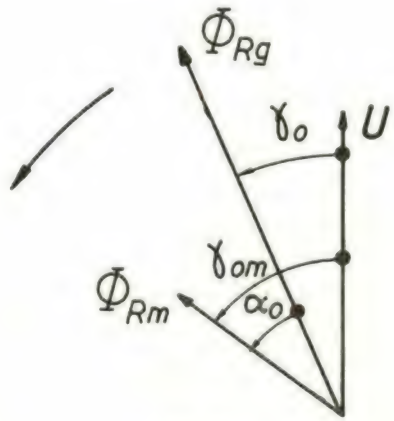


Fig. 2

A relação $\gamma_0 > 0$ significa avanço do rotor do gerador sobre a «fase encarnada» U;

A relação $\gamma_{om} > 0$ significa avanço do rotor do motor sobre a fase U;

A relação $\alpha_0 > 0$ representa um avanço inicial do rotor do motor sobre o rotor do gerador;

A relação $\gamma_0 = 0$ significa coincidência do eixo magnético do gerador com a fase U do estator;

A relação $\gamma_{om} = 0$ significa coincidência do eixo magnético do rotor do motor com a fase U;

A relação $\alpha_0 = 0$ significa a concordância inicial da posição dos dois rotores.

Para obter o valor de α_0 a partir dos valores

de γ_o e γ_{om}, torna-se necessária a determinação da posição de coincidência $\gamma_o = 0$ no gerador e $\gamma_{om} = 0$ no motor.

2. — *Determinação da posição de coincidência dos eixos magnéticos*

Ligamos o circuito do rotor, segundo o esquema da Fig. 3, a uma tensão alternada com a frequência de 50 períodos por segundo e regulamos a resistência r de maneira que o valor máximo da corrente alternada i no rotor seja adequado às experiências a realizar. O fluxo magnético alternado proveniente da corrente i que atravessa o rotor em repouso induz nas fases do estator tensões alternadas cujos valores máximos E_u, E_v, E_w dependem do ângulo γ entre o eixo magnético do rotor e o eixo magnético da fase U do estator. Designando por E_m o valor máximo da tensão induzida pelo rotor na fase U do estator na posição $\gamma = 0$, obtém-se para o valor máximo da tensão E_{wv} entre os terminais W e V, (Fig. 3), a seguinte expressão em função do ângulo γ

$$E_{wv} = E_w - E_v = \sqrt{3}\ E_m \sin \gamma$$

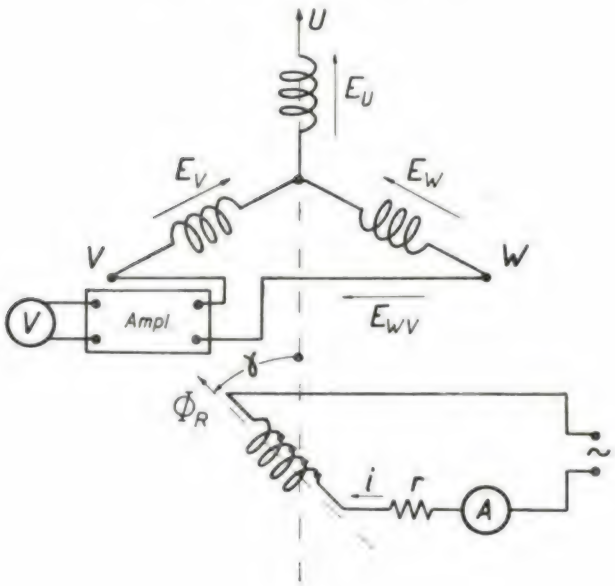


Fig. 3

Daqui se conclui que a indicação $E_{wv} = 0$ significa coincidência das direcções dos eixos magnéticos do rotor e da fase U do estator.

Para determinar esta posição de coincidência ligou-se a tensão E_{wv} a um voltímetro electrodinâmico por intermédio dum amplificador electrónico e fez-se rodar o veio do rotor até atingir a posição em que o voltímetro marcou zero e que corresponde portanto à referida coincidência.

Determinada, assim, esta coincidência para cada uma das máquinas, verificou-se a seguir a concordância dos sentidos dos eixos magnéticos dos rotores das mesmas máquinas. Para este fim utilizou-se, em cada uma das máquinas, um impulso de corrente originado pela ligação duma bateria ao circuito do rotor e observou-se o sentido da corrente induzida na fase U do estator ligada a um circuito contendo em série uma resistência e um galvanómetro de quadro móvel.

A seguir procedeu-se à verificação desta posição de concordância dos dois rotores pela ligação das máquinas segundo o esquema da Fig. 4.

Na posição de concordância já determinada e que pretendemos verificar, os rotores foram ligados em paralelo sobre uma tensão alternada segundo o esquema da Fig. 4. Os terminais U_g e U_m das fases do estator foram ligados a um amplificador electrónico que alimenta um voltímetro V. No caso de se dar a concordância, $\alpha_o = 0$, as tensões e_1 e e_2 indicadas no esquema são iguais e a tensão $e_x = e_2 - e_1$ anula-se, marcando o voltímetro zero.

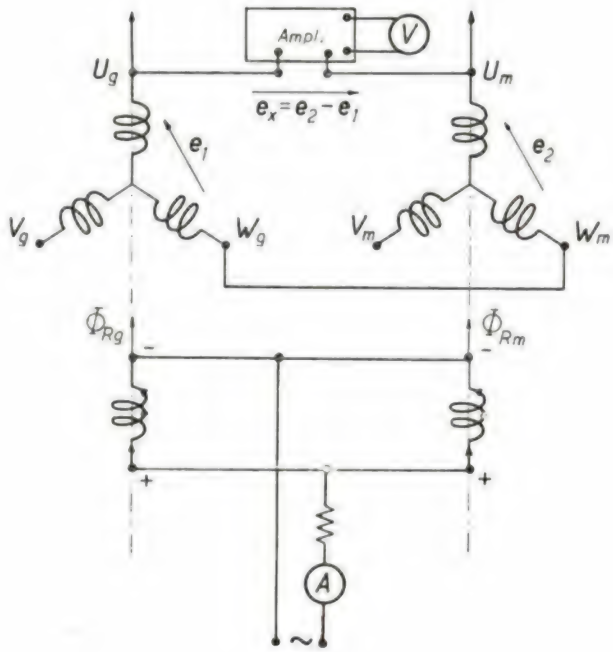


Fig. 4

Esta conclusão foi verificada experimentalmente. Fazendo rodar os rotores a partir desta

CENTRO DE PROJECTOS

COLOCA A SUA EXPERIÊNCIA AO SERVIÇO DA INDÚSTRIA NACIONAL

TORRE DE REFRIGERAÇÃO

NA ASSISTÊNCIA TÉCNICA

O CENTRO DE PROJECTOS CUF PODE PRESTAR ASSISTÊNCIA NAS DIVERSAS FASES DE UM PROJECTO, QUER COMO CONSULTOR NA AQUISIÇÃO DE MATERIAL, QUER FAZENDO A SUA POSTERIOR INSPECÇÃO E RECEPCÇÃO

O CONJUNTO DE TÉCNICOS DE QUE DISPÕE, O APOIO DA LONGA EXPERIÊNCIA INDUSTRIAL DA COMPANHIA UNIÃO FABRIL NOS VÁRIOS RAMOS DA INDÚSTRIA E AINDA A COLABORAÇÃO COM FIRMAS ESTRANGEIRAS GARANTEM A QUALIDADE DAS REALIZAÇÕES QUE LHE FOREM ENTREGUES

EXPONHA OS SEUS PROBLEMAS E DIRIJA AS SUAS CONSULTAS A **CENTRO DE PROJECTOS CUF** AV. 24 DE JULHO, 170 TELEF. 67 20 61 LISBOA - PORTUGAL TELEG PROFABRIL CP-5

ESTAMPARIAS TINTURARIAS LAVANDARIAS

PARA OS VOSSOS TECIDOS TECNICOS:
TRANSPORTADORES MANKONS, LAPPING, WOLFRIES.
FLANELAS, CANEVAS, ETC.,

EM FIBRAS NATURAIS OU SINTÉTICAS

Consultem:

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 93
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

FLUIDO E MASTIC

IMPERMEABILIZAÇÕES

TORNA TUDO ESTANQUE

Impermeabilização e vedação perfeita de:

Terraços, Empenas, Algerozes, Clarabóias,
Paredes húmidas, Coberturas, Fendas,
Juntas de dilatação, etc., etc.

Fácil aplicação — Elasticidade excepcional
Não endurece nem apodrece

ROOFATEX **À base de borracha + alumínio**

Reforça a acção impermeabilizante do «Rubio», dando às construções um aspecto agradável — Protege todos os materiais contra a humidade, a ferrugem e a corrosão

RUBIO E ROOFATEX dois produtos que se completam

Representante exclusivo: Orlando Fernandes

Rua Palmira, 46-A-B-C — LISBOA-1 — Telefs. 83 01 63 - 84 26 39 — End. teleg. «ORFER»

posição, no mesmo sentido e do mesmo ângulo, o voltímetro deve ainda marcar zero, o que também se verificou experimentalmente.

3. — *Dispositivo de leitura da posição relativa dos dois rotores*

Uma vez obtida a posição de coincidência entre o eixo magnético do rotor e o eixo magnético da fase U do estator, em cada uma das máquinas, foi esta logo assinalada por intermédio de um estilete que se fixou no estator e de um sinal de punção que se marcou no veio do rotor de maneira que a coincidência dos referidos eixos magnéticos se verifica quando o sinal de punção no veio do rotor se encontra em frente da ponta do estilete fixado no estator.

Com a finalidade da medição dos ângulos γ_o e γ_{om}, fixou-se sobre o veio de cada uma das máquinas uma tira de papel com uma escala em graus desde 0° até 360°, coincidindo a origem — 0° — com o sinal de punção acima referido e crescendo a graduação em sentido contrário ao sentido de rotação das máquinas. Desta maneira o estilete do estator de cada uma das máquinas indica sobre a respectiva escala no veio do rotor (Fig. 5 e 6) o ângulo em graus do avanço do rotor em relação à fase U do estator.

Desta maneira medem-se directamente os ângulos γ_o e γ_{om} e determina-se o ângulo $\alpha_o = \gamma_{om} - \gamma_o$ que representa a desfasagem inicial entre o rotor do motor e o rotor do gerador.

Para ângulos superiores a 180° determina-se a diferença entre o valor do ângulo medido e 360°. Esta diferença afecta-se do sinal negativo significando que se trata de um atraso do respectivo rotor em relação à fase U do estator.

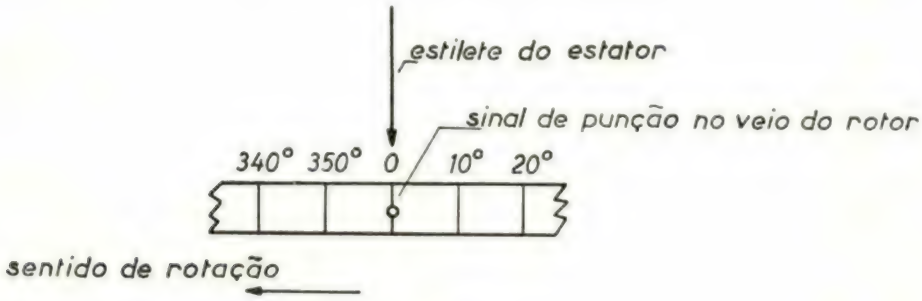


Fig. 5

III — DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE ANGULAR DO GERADOR E DO MOTOR

Empregamos um método aproximado para a determinação do valor instantâneo da velocidade angular em função do tempo, durante as duas primeiras voltas do arranque. O método consiste em determinar o valor médio da velocidade angular durante intervalos de tempo sucessivos

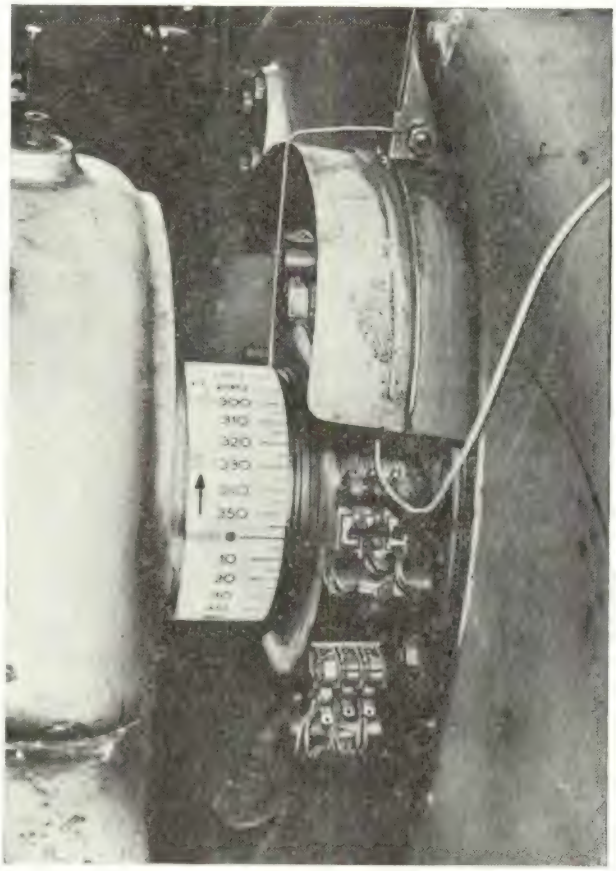


Fig. 6

e correspondentes a ângulos de rotação de 30° do veio da máquina e referir cada valor médio da velocidade assim obtido ao meio do intervalo de tempo que lhe diz respeito.

Decompomos assim uma rotação completa em 12 fracções ou sectores de 30° e basta medir o tempo correspondente a cada uma destas fracções de 30° para determinar a respectiva velocidade média do rotor durante a mesma fracção. Esta medição de tempo é feita utilizando uma corrente pràticamente sinusoidal com a frequência de 50 períodos por segundo, que permanecerá ligada durante a rodagem dum sector de 30° e estará interrompida durante a rodagem do sector seguinte e assim sucessivamente. Este fenómeno composto de intervalos em que circula a corrente de 50 períodos por segundo, alternando com intervalos em que a mesma se conserva interrompida, é oscilografado por um laço de medida. Desta maneira obtemos no oscilograma intervalos bem delimitados de ligação ou de interrupção da corrente, correspondendo todos eles a sectores de rodagem de 30°. O tempo correspondente a cada um destes intervalos é medido pela escala de tempo fornecida pelo oscilograma da corrente alternada de 50 períodos por segundo que permite a medição de 1/50 seg. entre dois máximos consecutivos.

Para conseguir a ligação e corte da corrente nas condições expostas, utilizamos, em cada uma das máquinas, um disco dividido em 12 sectores cada um de 30°, ligado ao veio e permitindo estabelecer contacto eléctrico entre duas escovas durante o intervalo de tempo correspondente à rotação do veio da máquina dum ângulo de 30° e interromper o contacto durante o seguinte sector de 30° e assim sucessivamente.

Este disco, cuja planificação está representada na Fig. (7), contém portanto 6 sectores de 30°,

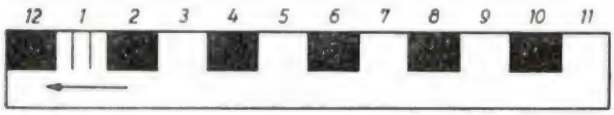


Fig. 7

de contacto, intercalados com 6 sectores de 30° de interrupção e encontra-se fotografado na Fig. (8).

Uma das escovas apoia-se sobre a parte do disco que contém os sectores isolantes intercalados na parte metálica e a outra escova apoia-se sobre a parte inteiramente metálica do disco.

Antes do arranque ajusta-se, em cada uma das máquinas, a posição do disco de contactos de maneira que a primeira destas escovas fique apoiada sobre a parte final do sector de interrupção n.° 12 a fim de que, logo que a máquina arranque, ela estabeleça contacto com o sector n.° 1 e ligue portanto a corrente no circuito ficando assim registado o início do arranque da respectiva máquina.

Atendendo a que nos primeiros momentos do arranque as velocidades são pequenas, dividiu-se o 1.° sector de contacto em 3 subsectores, de 10° cada um, que estão marcados na Fig. (7).

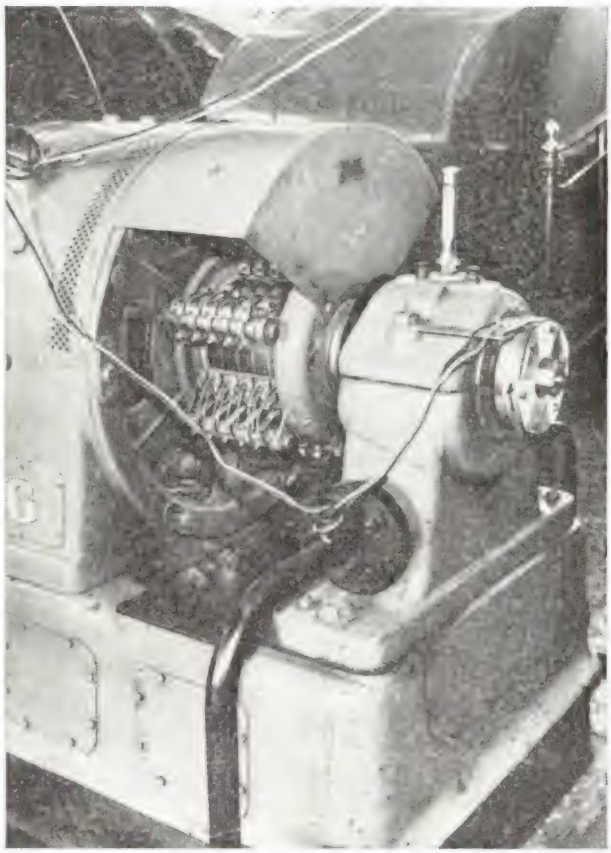


Fig. 8

IV — APLICAÇÃO DA TEORIA EXPOSTA A DOIS TURBO-ALTERNADORES DA CENTRAL TEJO

Aplicamos a teoria exposta ao estudo do comportamento dos dois alternadores trifásicos da Central Tejo, cada um com a potência nominal

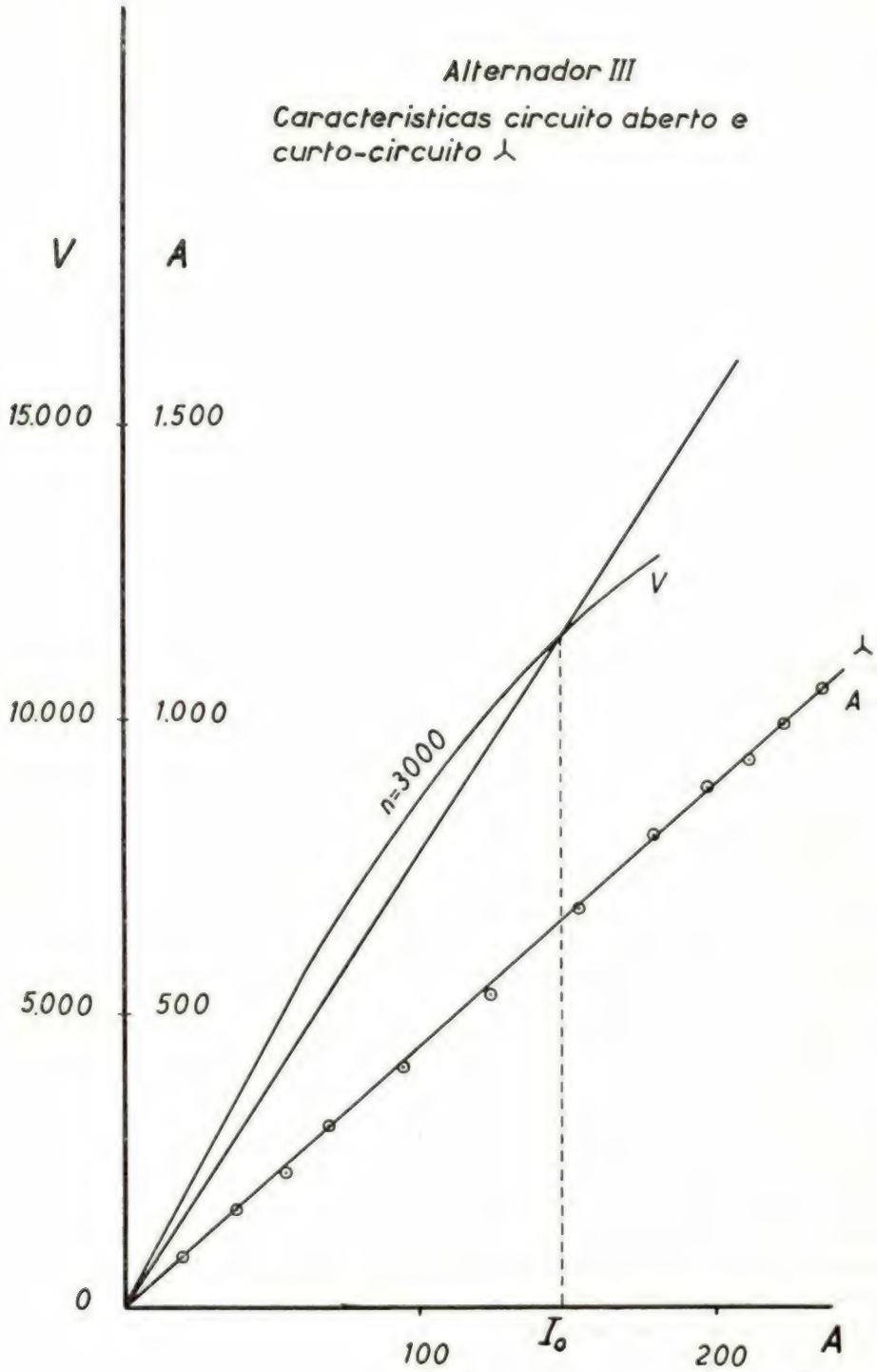


Fig. 9

de 18.900 KVA, durante o arranque síncrono dum deles funcionando como motor quando ligado através do seu barramento de alta tensão ao outro funcionando como gerador e lançado lentamente pela respectiva turbina. Estes alternadores trifásicos da Central Tejo são máquinas simétricas e bipolares de rotor cilíndrico.

1. *Constantes e características das máquinas*

Dados inscritos na placa de cada máquina :

V . . . . . 10.500 V⅄
KVA . . . . . 18.900 KVA.

Resistências :

Resistência total de um circuito do estator

incluindo as fases e os condutores de ligação:

$$R = R_g + R_m = 0{,}03\ \Omega$$

em que

$$R_g = R_m = 0{,}015\ \Omega$$

Reactância síncrona para $n = n_s = 3.000$ r. p. m.

Reactância síncrona de cada máquina: $X_g = X_m$
Reactância síncrona total: $X = X_g + X_m$

O valor da reactância síncrona de cada máquina depende do seu estado de saturação magnética e determina-se a partir das respectivas características em circuito aberto e em curto-circuito. Estas duas características foram-nos fornecidas pela Central Tejo e encontram-se representadas na Fig. 9.

2. *Estudo e realização prática do arranque síncrono*

De acordo com a teoria exposta e com as caracteristidas apresentadas, escolhemos, para conseguir o arranque suave do motor, as seguintes correntes de excitação independente dos rotores:

$$I_{Rg} = 200\ A \qquad I_{Rm} = 100\ A$$

Estando as máquinas em repouso observou-se que o avanço do rotor do motor sobre o rotor gerador era de $\sigma_0 = 20^o$.

Durante os ensaios de arranque síncrono, a turbina encontrava-se ligada ao veio da máquina que devia arrancar como motor.

Ligadas as máquinas segundo o esquema da Fig. 1 e verificados os referidos valores das correntes de excitação, comandou-se em seguida o arranque da turbina que acciona o gerador entrando este lentamente em movimento. Verificou-se experimentalmente que, enquanto o gerador roda os primeiros 10° durante cerca de meio segundo, o rotor do motor se mantém ainda em repouso. Terminado este intervalo de tempo, cerca de meio segundo, verifica-se o arranque suave do motor e as duas máquinas gerador e motor rodam e entram pràticamente em sincronismo ao fim da 4.ª volta do motor. O intervalo de tempo entre o início do movimento do gerador e o arranque do motor representa o tempo necessário para que as correntes no estator do motor, originadas pelas f. e. m. do gerador, atinjam valores tais que o campo girante por elas produzido consiga arrastar no seu movimento o rotor do motor vencendo assim o binário do atrito.

3. *Regímen estacionário e diagrama vectorial para $n_g = n_m = n = 150$ r. p. m.*

Efectuado este arranque admitimos que se estabeleceu o sincronismo das máquinas em regímen estacionário para $n_g = n_m = n = 150$ r. p. m. e que se mantiveram as correntes de excitação dos rotores $I_{Rg} = 200$ A e $I_{Rm} = 100$ A.

Estudamos a seguir este regímen estacionário e estabelecemos o respectivo diagrama vectorial.

O estado de saturação magnética de cada máquina, neste regímen de funcionamento, é caracterizado pelo valor da f. e. m. resultante induzida numa fase do estator pelo fluxo magnético resultante originado pela sobreposição do fluxo proveniente do rotor com o fluxo do campo girante das correntes do estator.

Considerando a reactância síncrona de cada máquina decomposta em duas partes, sendo uma relativa ao fluxo principal ou útil e outra relativa ao fluxo de dispersão obtemos as seguintes relações:

$$(29) \qquad \begin{aligned} X_g &= X_{gp} + X_{g\lambda} \\ X_m &= X_{mp} + X_{m\lambda} \end{aligned}$$

em que as reactâncias X_{gp} e X_{mp} dizem respeito a fluxos principais e $X_{g\lambda}$ e $X_{m\lambda}$ a fluxos de dispersão. Das relações (21) da teoria e das relações (29) resulta:

$$(30) \qquad \begin{cases} \dot{E}_{rg} = \dfrac{n}{n_s}\,\dot{E}_g - j\,\dot{I}\,\dfrac{n}{n_s}\,X_{gp} = \\ \quad = \dot{E}_k + \dot{I}\,R_g + j\,\dot{I}\,\dfrac{n}{n_s}\,X_{g\lambda} \\ \dot{E}_{rm} = \dfrac{n}{n_s}\,\dot{E}_m + j\,\dot{I}\,\dfrac{n}{n_s}\,X_{mp} = \\ \quad = \dot{E}_k - \dot{I}\,R_m - j\,\dot{I}\,\dfrac{n}{n_s}\,X_{m\lambda} \end{cases}$$

em que $\dot{E}_{rg}$ e $\dot{E}_{rm}$ representam as f. e. m. resultantes induzidas numa fase do estator do gerador e numa fase do motor pelo respectivo fluxo resultante.

Desprezando nas relações (30) a queda de tensão ohmica e a queda de tensão devida à dispersão em relação à tensão por fase nos terminais $\dot{E}_k$, conclui-se

$$(31) \qquad \dot{E}_{rg} = \dot{E}_{rm} = \dot{E}_k\ .$$

Nestas condições a tensão E_k representa, segundo a relação (31), a grandeza que caracteriza o estado de saturação magnética comum às duas máquinas.

Este estado de saturação magnética que resulta, em cada máquina, da sobreposição do fluxo originado pela corrente de excitação do rotor com o fluxo produzido pelas correntes do estator, pode ser obtido sòmente por uma corrente de excitação I_o percorrendo o circuito do rotor e produzindo um fluxo igual ao fluxo resultante da sobreposição mencionada.

Conservando o estator aberto, esta corrente I_o no circuito do rotor representa a corrente de magnetização do fluxo resultante e pode ser determinada a partir das correntes de excitação I_{Rg} e I_{Rm} dos rotores das máquinas.

Para esta determinação utilizamos a relação (21a) da teoria que tem a seguinte forma

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2}\left(\dot{E}_g + \dot{E}_m\right)\frac{n}{n_s}\,. \tag{21a}$$

A desfasagem α entre as duas f. e. m. $\dot{E}_g$ e $\dot{E}_m$ é condicionada por uma desfasagem igual entre os respectivos fluxos e coincide com a desfasagem entre os rotores que foi aproximadamente determinada a partir da sua desfasagem inicial em repouso $\alpha_o = +20°$ e do registo do movimento dos dois rotores até $n = 150$ r. p. m. Para esta desfasagem α obteve-se o valor $\alpha = -20°$, o que significa que o eixo magnético do rotor do motor se encontra para $n = 150$ r.p.m. com um atraso de 20° sobre o eixo magnético do gerador.

Daqui se conclui, para o caso presente em que $I_{Rg} = 2\,I_{Rm}$, a seguinte igualdade:

$$E_g = 2\,E_m\,. \tag{33}$$

A partir desta igualdade e da relação (21a) construiu-se o diagrama vectorial (Fig 10) correspondente à relação

$$2\,\dot{E}_k = \dot{E}_g\,\frac{n}{n_s} + \dot{E}_m\,\frac{n}{n_s}\,.$$

Do triângulo $\overset{\triangle}{OAF}$ deste diagrama e da relação (33) resulta a expressão

$$E_k = E_m\,\frac{n}{n_s}\sqrt{\frac{5}{4} + \cos\alpha} \tag{34}$$

Das relações (32) e (34) resulta

$$I_o = I_{Rm}\sqrt{\frac{5}{4} + \cos\alpha} \tag{35}$$

em que I_o representa o valor da corrente de magnetização que pretendiamos determinar.

Entrando com este valor da corrente de excitação I_o na característica não linear (Fig. 9) em circuito aberto para $n_s = 3000$ r. p. m. determinamos o ponto correspondente ao valor de E_k que caracteriza o estado de saturação das duas máquinas. A característica linear admitida passará portanto pela origem e por este ponto (E_k, I_o) ficando assim determinada a sua inclinação.

A partir desta característica linear determinamos os valores das f. e. m. $E_g\,\frac{n}{n_s}$ e $E_m\,\frac{n}{n_s}$.

Podemos agora determinar os valores numéricos para o caso presente em que são dadas as excitações dos rotores — $I_{Rg} = 200$ A, $I_{Rm} = 100$ A —, o número de rotações por minuto $n = 150$ r. p. m. e o ângulo de desfasagem $\alpha = -20°$.

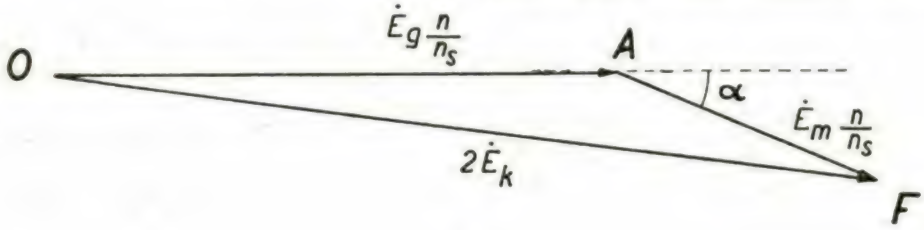


Fig. 10

Admitindo para o presente estado de saturação magnética uma característica linear relacionando as f. e. m. com as respectivas correntes de excitação, obteremos as relações

$$\frac{E_g}{E_m} = \frac{I_{Rg}}{I_{Rm}} \qquad \frac{E_k}{E_m\,\frac{n}{n_s}} = \frac{I_o}{I_{Rm}}\,. \tag{32}$$

Da relação (35) resulta

$$I_o = I_{Rm}\,.\,1{,}48 = 148\ \text{A}\,.$$

Entrando com este valor na característica não linear Fig. (9) obtêm-se os valores eficazes

$$E_{k\,n=3000} = \frac{11320}{\sqrt{3}} = 6540 \text{ V}$$

$$E_{k\,n=150} = 327 \text{ V}$$

Das relações (32) ou gràficamente utilizando a característica linear passando pelo ponto (E_k I_o) determinam-se as f. e. m. para n = 150 r. p. m. a partir das respectivas excitações:

para $I_{Rg} = 200$ A obtém-se $E_g \frac{n}{n_s} = 440$ V

para $I_{Rm} = 100$ A obtém-se $E_m \frac{n}{n_s} = 220$ V

A partir destes valores eficazes das f. e. m. obtém-se para os fluxos ψ_{Rg} e ψ_{Rm} que lhes dão origem os seguintes valores eficazes

$$\psi_{Rg} = 28 \text{ V seg.} \qquad \psi_{Rm} = 14 \text{ V seg.}$$

Como o estado de saturação magnética das duas máquinas é caracterizado pela corrente $I_o = 148$ A e as excitações dos seus rotores são respectivamente $I_{Rg} = 200$ A e $I_{Rm} = 100$ A conclui-se que, no funcionamento em questão, o campo girante do estator dá lugar no gerador a um efeito desmagnetizante e no motor a um efeito magnetizante, efeitos estes que, com as referidas aproximações, condicionam a mesma saturação magnética nas duas máquinas.

Procedemos agora à determinação da reactância síncrona das máquinas para este estado de saturação magnética correspondente a $I_o = 148$ A. Como as máquinas têm as mesmas constantes, basta determinar a reactância síncrona duma delas. Determinamos assim X_g para $I_o = 148$ A a partir das características em circuito aberto e em curto-circuito (Fig. 9).

Partimos da relação (21) da teoria

$$\dot{E}_k = \dot{E}_g \frac{n}{n_s} - \dot{I}_{Rg} - j\,\dot{I}\,\frac{n}{n_s} X_g \tag{21}$$

e consideramos dois casos particulares:

circuito aberto $\dot{I} = 0$ e curto-circuito $\dot{E}_k = 0$.

Obtemos os seguintes resultados a partir da relação (21):

Em circuito aberto será $\dot{I} = 0$ e obtém-se

$$\dot{E}_{ko} = \frac{n}{n_s} \dot{E}_g \; ; \tag{36}$$

em curto-circuito será $\dot{E}_k = 0$ e obtém-se a corrente de curto-circuito $\dot{I}_{cc}$

$$\dot{I}_{cc} = \frac{\dot{E}_g \frac{n}{n_s}}{R_g + j \frac{n}{n_s} X_g} \; . \tag{37}$$

Para $R_g << X_g \frac{n}{n_s}$ podemos desprezar na expressão (37) a grandeza R_g em relação a $X_g \frac{n}{n_s}$ o que conduz à expressão

$$\dot{I}_{cc} = \frac{\dot{E}_g}{j\,X_g} \tag{38}$$

donde resulta

$$X_g = \frac{E_g}{I_{cc}} \; . \tag{39}$$

As grandezas E_g e I_{cc} determinam-se a partir das respectivas características (Fig. 9) em circuito aberto e em curto-circuito para a mesma corrente de excitação I_o.

No caso presente correspondem à corrente de excitação $I_o = 148$ A os seguintes valores:

corrente de curto-circuito $I_{cc} = 660$ A

tensão em circuito aberto $E_g = \frac{11.400}{\sqrt{3}}$ V

donde resulta

$$X_g = \frac{E_g}{I_{cc}} = 10\ \Omega.$$

Atendendo à igualdade $X_m = X_g$ obtém-se, segundo a relação (11) da teoria, o seguinte resultado:

$$X = X_g + X_m = 20\ \Omega.$$

A partir das f. e. m. $\dot{E}_g \frac{n}{n_s}$ e $\dot{E}_m \frac{n}{n_s}$ obteve-se no diagrama vectorial (Fig. 11) a sua diferença $(\dot{E}_g - \dot{E}_m)\frac{n}{n_s}$ que permite determinar a corrente $\dot{I}$ no circuito do estator a partir da expressão (19) da teoria que tem a seguinte forma

$$\dot{I} = \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m)\,\frac{n}{n_s}}{R + j\,X\,\frac{n}{n_s}} \tag{19}$$

Nesta expressão podemos, para $n = 150$ r.p.m., desprezar R em relação a $X \frac{n}{n_s}$ visto ser $R = 0{,}03\ \Omega$ e $X \frac{n}{n_s} = 1\ \Omega$.

Obtém-se assim a expressão (23) da teoria que tem a forma

$$\dot{I} = -j \frac{(\dot{E}_g - \dot{E}_m)}{X} \tag{23}$$

e mostra que nestas condições, $\left(X \frac{n}{n_s} >> R\right)$, o valor da corrente no estator é independente da velocidade comum das máquinas.

tência R, a partir da relação (19a) da teoria. Desta relação resulta

$$\operatorname{tg} \varphi_o = \frac{X}{R} \frac{n}{n_s} = \frac{20}{0{,}03} \frac{1}{20} = 33{,}3$$

e portanto

$$\varphi_o = 88^\circ\ 20' .$$

Este valor do ângulo de desfasagem foi arredondado para o valor $\frac{\pi}{2}$ no diagrama vectorial (Fig. 11).

A partir deste valor da corrente e do valor da reactância síncrona $X_m = X_g$ obtêm-se os fluxos

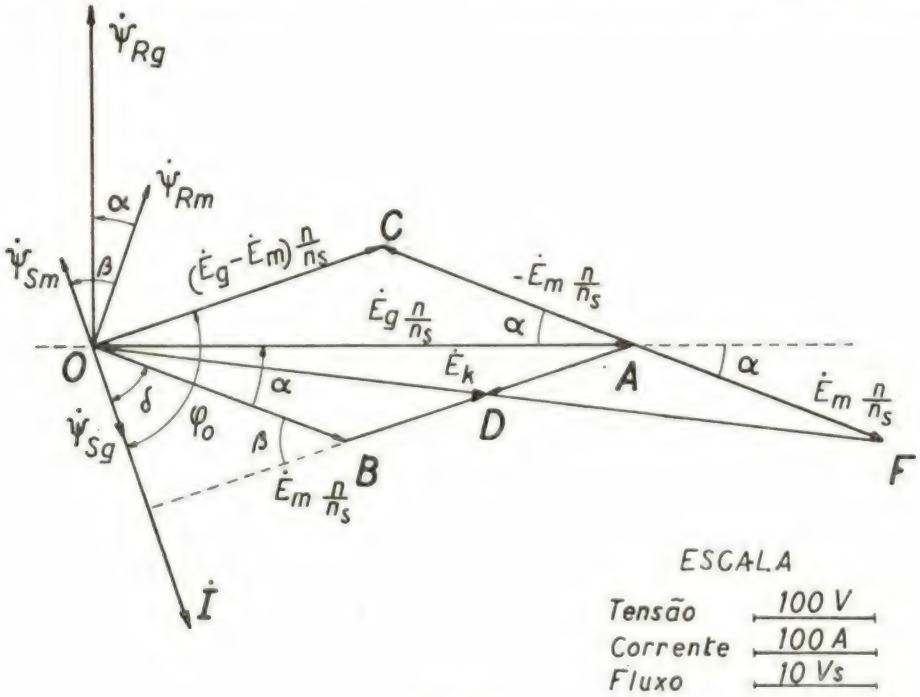


Fig. 11

A partir do diagrama vectorial obtém-se o valor eficaz

$$\left| \dot{E}_g - \dot{E}_m \right| \frac{n}{n_s} = 245 \text{ V}$$

e, tomando em linha de conta que $X = 20\ \Omega$ e $\frac{n}{n_s} = \frac{1}{20}$, resulta de (19) para $R << X \frac{n}{n_s}$ o valor eficaz da corrente

$$I = 245 \text{ A}$$

estando a mesma corrente $\dot{I}$ em atraso aproximadamente de $\frac{\pi}{2}$ em relação a $(\dot{E}_g - \dot{E}_m) \frac{n}{n_s}$.

Este atraso calcula-se, sem desprezar a resis-

$\dot{\psi}_{Sm}$ e $\dot{\psi}_{Sg}$ originados pelas correntes que percorrem o estator do motor e do gerador.

Temos assim : $\dot{\psi}_{Sm} = -\dot{I} \frac{X_n}{\omega_s}$, $\dot{\psi}_{Sg} = \dot{I} \frac{X_g}{\omega_s}$

donde se obtém

$$\psi_{Sm} = 7{,}8 \text{ Vs. e } \psi_{Sg} = 7{,}8 \text{ Vs.}$$

Com base nos resultados que acabamos de obter para este regime estacionário correspondente aos valores

$I_{Rg} = 200$ A $\qquad I_{Rm} = 100$ A

$n = 150$ r.p.m. $\qquad \alpha = -20^\circ$

estabelecemos o respectivo diagrama vectorial na Fig. 11. Este diagrama é a expressão geo-

métrica das equações vectoriais (19), (21) e (21 a) da teoria para $X \frac{n}{n_s} >> R$ tomando em linha de conta o estado de saturação magnética que se estabelece nas máquinas. Encontram-se representadas as seguintes grandezas:

$$\overline{OA} = \dot{E}_g \frac{n}{n_s} \qquad \overline{AD} = -j\,\dot{I}\,X_g \frac{n}{n_s}$$

$$\overline{OB} = \dot{E}_m \frac{n}{n_s} \qquad \overline{BD} = +j\,\dot{I}\,X_m \frac{n}{n_s}$$

$$\overline{OC} = \left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s} \qquad \overline{OD} = \frac{\overline{OF}}{2} = \dot{E}_K$$

$$\dot{\psi}_{Rg} \quad \dot{\psi}_{Rm} \quad \dot{\psi}_{Sm} \quad \dot{\psi}_{Sg} \quad \dot{I}\,.$$

A partir destes dados e da relação (19 a) obtém-se a relação

$$\operatorname{tg} \varphi_o = 0{,}222\ n$$

que permite determinar para cada valor de n a grandeza tg φ_o e portanto φ_o.

Desta maneira construiu-se o gráfico da Fig. 12 que representa φ_o em função de n.

Este gráfico mostra que, no seu início, a desfasagem φ_o cresce ràpidamente com n, atingindo já para n = 25 r. p. m. o valor $\varphi_o = 80^o$ e tendendo assintòticamente para $\varphi_o = 90^o$.

Este crescimento rápido de φ_o dá lugar a um deslocamento no sentido dos atrasos da estrela de correntes do estator em relação à estrela das

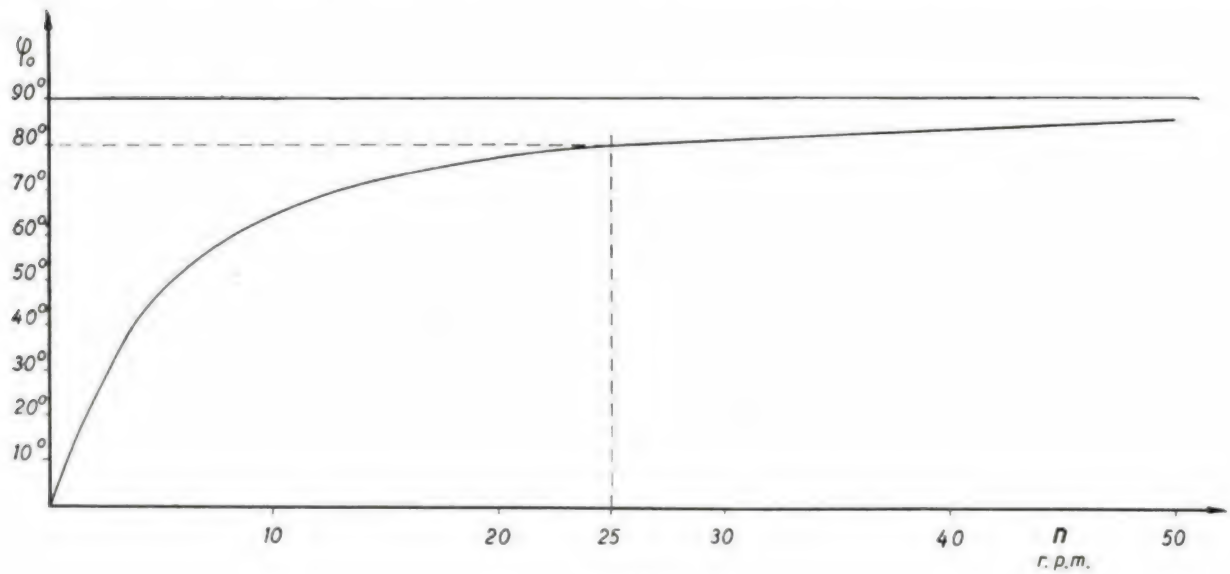


Fig. 12

4. *Variação da desfasagem interna φ_o e sua influência no arranque*

A desfasagem interna φ_o entre a corrente $\dot{I}$ do circuito e a f. e. m. $\left(\dot{E}_g - \dot{E}_m\right) \frac{n}{n_s}$ é dada pela relação (19 a) da teoria

$$\text{(19 a)} \qquad \operatorname{tg} \varphi_o = \frac{X \frac{n}{n_s}}{R} = \left(\frac{X}{R\ n_s}\right) n\,.$$

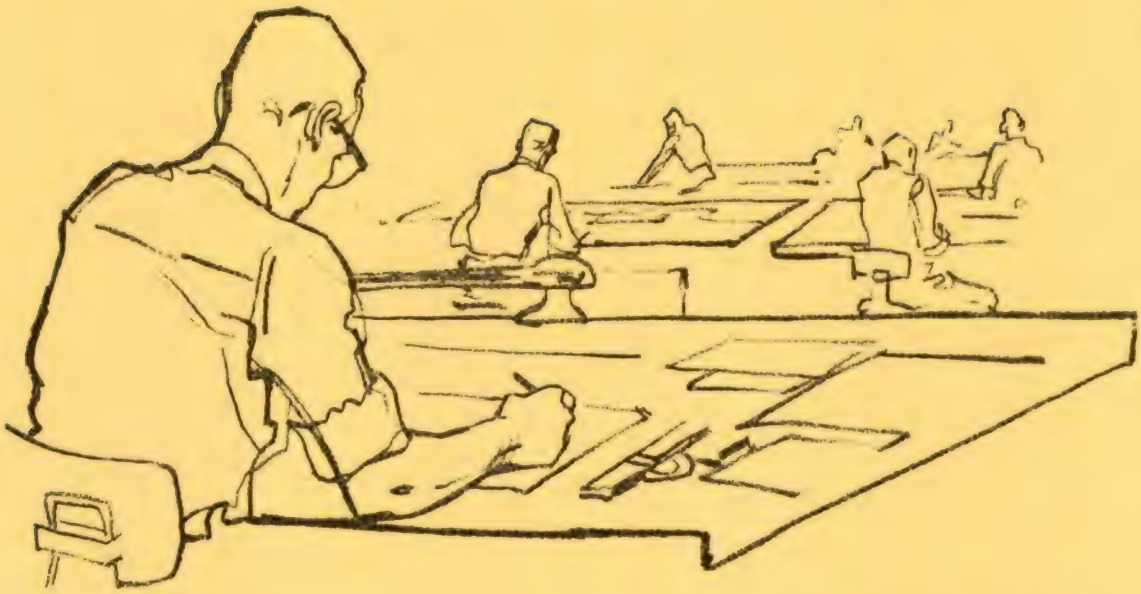
No caso presente temos os seguintes dados:

$X = 20\ \Omega \qquad R = 0{,}03\ \Omega \qquad n_s = 3.000$ r.p.m.

f. e. m. $(\dot{E}_g - \dot{E}_m) \frac{n}{n_s}$. Desde n = 0 até n = 50 r. p. m. o ângulo φ_o cresce de 0° até 85°.

Por sua vez o deslocamento da estrela de correntes do estator condiciona, em cada uma das máquinas, um movimento de rotação dos respectivos campos girantes $\psi_{Sm\lambda}$ e $\psi_{Sg\lambda}$ em relação aos circuitos dos seus rotores que irão reagir por indução. Esta reacção dos circuitos dos rotores condiciona durante a parte inicial do arranque uma zona de grandes correntes no estator com valores bastante superiores ao valor já calculado para n = 150 r. p. m.

Na máquina a arrancar como motor o campo girante $\psi_{Sm\lambda}$ das correntes do estator encontra-se



CATERPILLAR* + S.T.E.T.

O BINÓMIO MAIS VANTAJOSO PARA QUALQUER PROBLEMA DE

MOVIMENTAÇÃO DE TERRAS

CATERPILLAR* O fabricante mais especializado, em todo o mundo, de tractores de rasto e de rodas, pás mecânicas de rasto e rodas (traxcavators*), motoniveladoras, moto-scrapers, escarificadores, "bulldozers", motores industriais e marítimos, grupos electrogéneos.

S.T.E.T.

SOCIEDADE TECNICA DE EQUIPAMENTOS E TRACTORES, S.A.R.L.

DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO EM PORTUGAL CONTINENTAL, ILHAS ADJACENTES, CABO VERDE E GUINÉ

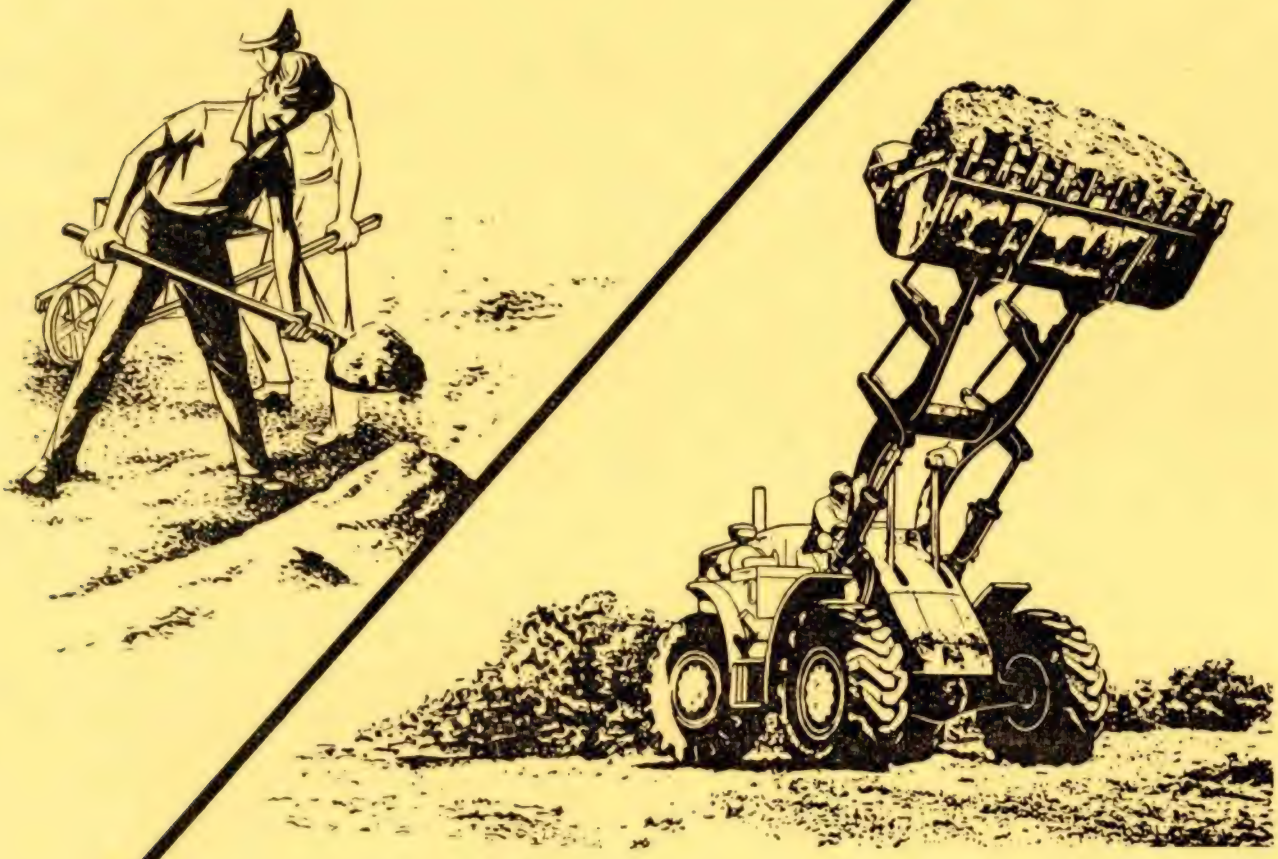
ASSISTÊNCIA – REPARAÇÕES – PEÇAS GENUÍNAS

PRIOR VELHO — SACAVÉM
TELEF.: 251 0001/4 — TELEG.: «STETRA» — APARTADO 1351
LISBOA

*«CATERPILLAR» E «TRAXCAVATOR» SÃO MARCAS REGISTADAS DE CATERPILLAR TRACTOR CO. – PEORIA, ILLINOIS – E. U. A.

APA

DA PÁ
CLÁSSICA
E DO CARRINHO
DE MÃO...



...À
PÁ MECÂNICA
(TRAXCAVATOR*)
CATERPILLAR*

TODO UM CAMINHO PERCORRIDO NA PROCURA DA MELHOR REALIZAÇÃO DO TRABALHO — DA MANEIRA MAIS EFICIENTE, MAIS ECONÓMICA E MAIS LUCRATIVA — PARA UMA MELHOR SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES HUMANAS.

ACTUALMENTE, EM QUALQUER TRABALHO DE

cerâmicas, minas e pedreiras,

A PALAVRA DA ORDEM É

CATERPILLAR*

DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO:

S.T.E.T.

SOCIEDADE TÉCNICA DE EQUIPAMENTOS E TRACTORES, S.A.R.L.
PRIOR VELHO — SACAVÉM
TELEF. 251 0001/4 — TELEG. «STETRA» — APARTADO 1351 — LISBOA

* «CATERPILLAR» E «TRAXCAVATOR» SÃO MARCAS REGISTADAS DE CATERPILLAR TRACTOR CO. — PEORIA, ILLINOIS — E. U. A.

normalmente em avanço em relação ao campo girante $\psi_{Rm\Delta}$ do rotor dando assim lugar a um binário positivo que tende a acelerar o rotor. Pode porém acontecer que devido ao referido deslocamento da estrela de correntes o respectivo campo girante $\psi_{Sm\Delta}$ se atrase transitòriamente em relação a $\psi_{Rm\Delta}$ dando assim lugar a um binário negativo que retardará o rotor do motor enquanto durar este atraso.

O rotor do motor deminuirá então a sua velocidade o que corresponde a dizer que o campo girante $\psi_{Rm\Delta}$ rodará mais devagar até conseguir colocar-se de novo em atraso relativamente a $\psi_{Sm\Delta}$ tornando-se então o binário positivo de maneira a acelerar novamente o movimento do rotor.

Estes fenómenos só podem dar-se no início do arranque porque a partir de n = 50 r. p. m. o ângulo de desfasagem φ_0 pouco varia com a velocidade do rotor.

A realização experimental do arranque passou-se de acordo com esta apreciação.

A segunda parte deste trabalho com o título —

Arranque Síncrono de Turbo-Alternadores

B. APRESENTAÇÃO E APRECIAÇÃO DE OSCILOGRAMAS

será publicada no próximo número desta Revista.

Reunião internacional dos Laboratórios de ensaios e de pesquisas sobre materiais e construções

R I L E M

A multiplicação das reuniões internacionais, congressos, simpósios, colóquios, etc., e as deslocações demasiado frequentes, a que as mesmas obrigam os homens de Laboratório, levaram a Comissão Permanente da RILEM a promover colóquios por correspondência, que permitem o exame em comum dos problemas pelos especialistas dos diversos países, e a confrontação de opiniões e sua discussão, sem os inconvenientes de viagens por vezes longas e dispendiosas.

O primeiro tema já escolhido, «Métodos e Instrumentos de Medida da Humidade nos Materiais de Construção», tem sido tratado em numerosos estudos e publicações, mas não havia ainda sido objecto de um verdadeiro trabalho de síntese.

Quer em edificações, quer em estruturas, quer em trabalhos de estradas o conhecimento exacto da humidade e das suas variações nos materiais é da maior importância.

Baseados em princípios da física clássica, são fabricados por numerosas firmas aparelhos de medida de humidade de sólidos, com aperfeiçoamentos de pormenor mais ou menos engenhosos, alguns deles concebidos para um dado material e adoptados numa aplicação industrial determinada. Na maioria, são teòricamente apropriados para determinar a quantidade de água que se encontra em qualquer material sob qualquer forma. Os Laboratórios porém vêm-se frequentemente obrigados a desenvolver métodos de medida da humidade adequados aos problemas que pretendem estudar, e as soluções originais assim encontradas nem sempre são publicadas, ou não têm a divulgação conveniente.

A publicação final deste primeiro colóquio por correspondência (Boletim da RILEM n.º 15, Junho 1962) inclui os relatórios apresentados e as discussões que eles suscitaram entre os participantes, e constitui pois um documento do maior interesse.

Reunião internacional da cooperação mediterrânea para a energia solar (Comples)

De 8 a 9 de Abril último, teve lugar em Madrid uma reunião dos membros desta Associação.

Esta Associação, criada há dois anos, agrupa cerca de quarenta cientistas que se interessam pelos trabalhos de investigação relativos à utilização da energia solar nos países da bacia mediterrânea.

Os seus objectivos são os seguintes:

— Estabelecer contactos íntimos e frequentes entre todos os membros, tendo em vista trocas de informações relativas aos trabalhos empreendidos;

— Evitar, com base na experiência comum, os esforços dispersos e a continuação dos trabalhos de investigação seguindo orientações sem possibilidade de êxito;

— Definir novos rumos de investigação e estabelecer programas comuns próprios das latitudes mediterrâneas;

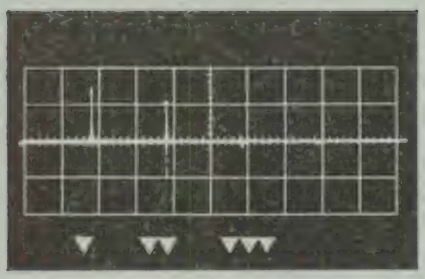
— Estudar a colaboração entre os laboratórios e a indústria com vista à realização de dispositivos económicos de utilização da energia solar.

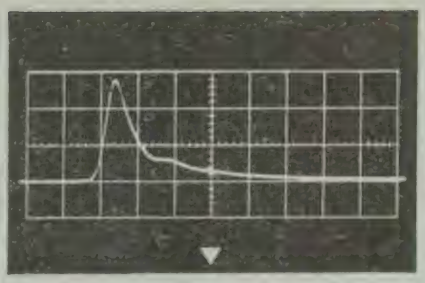
Em Portugal fazem parte do «Comples»:

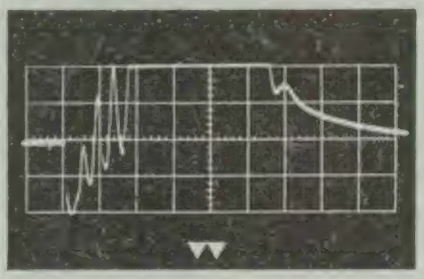
Manuel Rocha — Director do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

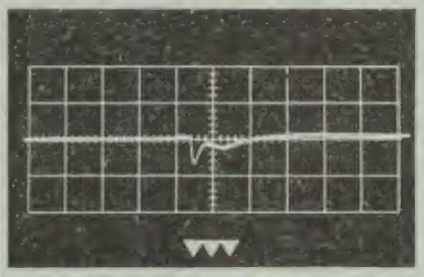
J. Laginha Serafim — Engenheiro investigador.

A. L. Salgado Prata — Engenheiro do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

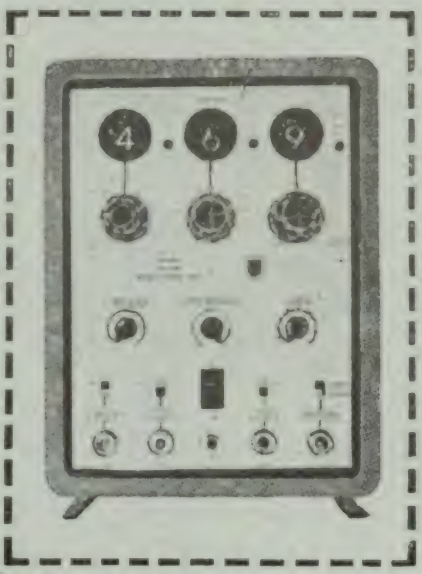








agora é possível **estudar em detalhe** cada ciclo de uma curva, utilizando qualquer osciloscópio cuja base de tempo possa ser disparada externamente, utilizando **a nova unidade de atraso de disparo PHILIPS, tipo GM 4585**



gama de atraso ajustável por degraus e continuamente desde 2,5 μs até 100 ms com indicação digital

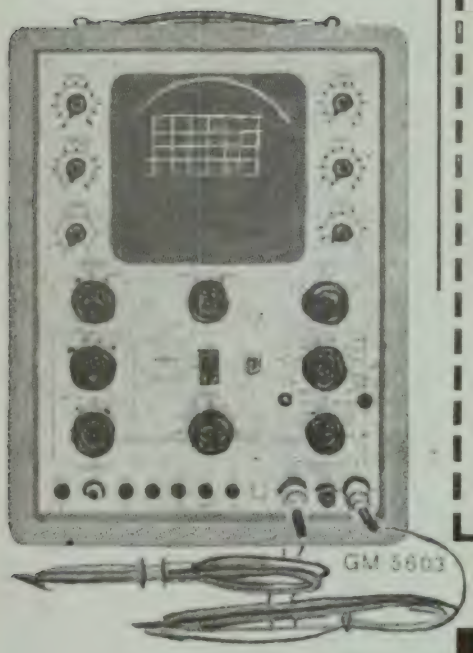
instabilidade ('jitter') inferior a 0,01% do valor final da gama escolhida

saída: impulsos para disparo atrasado da base de tempo do osciloscópio e os correspondentes impulsos seleccionadores no tempo ("pulse gate"), positivos e negativos, para a observação directa da zona a estudar

separador de sincronismo incorporado para disparo, comandado pelos impulsos de quadro de televisão com facilidade para sincronizar os impulsos de disparo atrasados com os impulsos de sincronismo de linha

alimentação: 110, 145, 200, 220 e 245 V, 40 - 100 c/s

oscilogramas feitos com um osciloscópio Philips, tipo GM 5603



PHILIPS

instrumentos electrônicos de medição

Vendas e assistência técnica em todo o Mundo
Philips Portuguesa S.A.R.L., Rua Joaquim Antonio d'Aguiar 66, LISBOA
Philips, Dept° EMA, EINDHOVEN, Holanda

válvulas

- passagem
- retenção
- regulação
- cunha

PARA LÍQUIDOS, VAPORES E GASES (INCLUINDO NH_3 E SO_2) EM

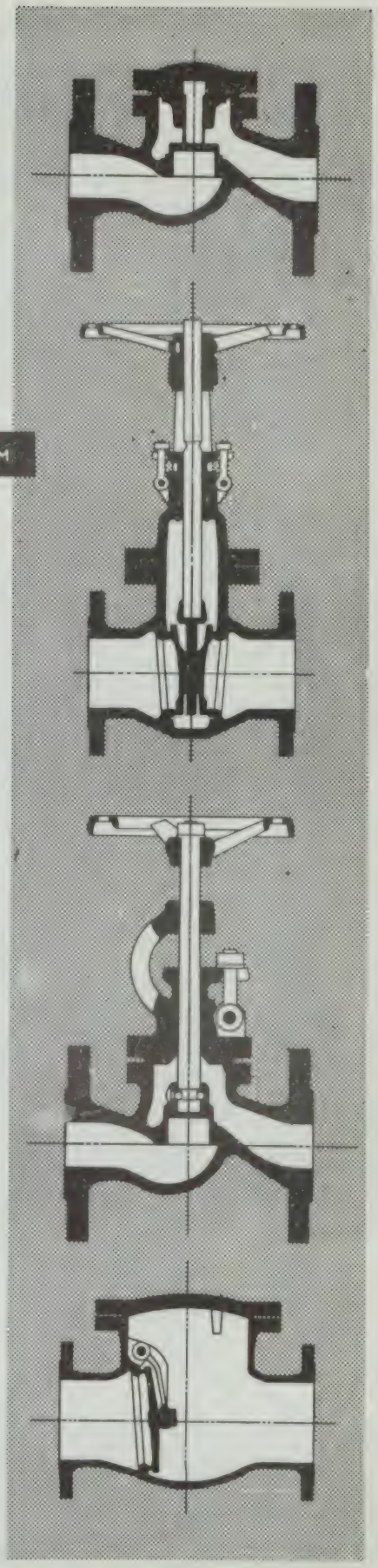
ferro fundido
ferro fundido com grafite esferoidal
aço vasado
aço inoxidável

DN 10 mm até 600 mm **PN 6 a 40 kg/cm²**

conforme as normas **DIN** e **ASA**

VÁLVULAS DE SEGURANÇA, DE REDUÇÃO, ELECTROMAGNÉTICAS E VÁLVULAS ESPECIAIS

- estudos
- projectos
- orçamentos
- assistência técnica



SOCIEDADE PORTUGUESA DE VÁLVULAS, LDA.
RUA DA ACADEMIA DAS CIENCIAS, 5 — LISBOA 2
TELEFONE: PPCA 31710—5 LINHAS

C. D. U. 621.313.013.001

APLICAÇÃO DO MÉTODO DAS ANALOGIAS ELÉCTRICAS AO ESTUDO DE ALGUNS PROBLEMAS RELATIVOS AO CAMPO MAGNÉTICO DAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PELO ENG.º ELECT. (I.S.T.) CARLOS DE MEDEIROS PORTELA

Assistente do I. S. T.

(Continuação)

CAPÍTULO II

Aplicação do método das analogias eléctricas ao estudo do campo magnético no entreferro, dentes e cavas das máquinas eléctricas, designadamente, das máquinas de corrente contínua

1 Introdução

As características das bobinas indutoras das máquinas eléctricas, designadamente das máquinas de corrente contínua e dos alternadores, e as dimensões dos polos e da carcassa, dependem em larga medida do cálculo da relutância magnética do conjunto entreferro, dentes e cavas. Esse cálculo pode ser feito avaliando primeiramente a relutância do conjunto sem ter em conta os efeitos dos topos e dos bordos dos polos, bem como os das correntes de Foucault e das correntes que percorrerem os condutores do induzido. Estes efeitos são depois considerados por vários processos correctivos. Esse primeiro cálculo da relutância magnética é feito correntemente a partir de hipóteses apenas grosseiramente aproximadas, que conduzem a erros apreciáveis, e que, independentemente do acerto das correcções devidas aos factos indicados, têm repercussão sensível no peso de cobre e de ferro da máquina e portanto no seu custo. Além disso, dada a imprecisão do resultado, há necessidade de uma margem de segurança elevada no dimensionamento das bobinas indutoras, o que pode levar a utilizá-las em série com resistências; há assim um aumento de consumo e portanto uma diminuição do rendimento. Além dos dois factos apontados — aumentos de custo e das perdas — o conhecimento, com razoável aproximação, da relutância magnética do conjunto entreferro, dentes e cavas, tem bastante importância para a determinação, e, portanto, no projecto, para o estabelecimento, das características de uma máquina.

O conhecimento, com relativa aproximação, da indução magnética nos dentes, é também elemento de primordial importância para o cálculo das perdas magnéticas. São normalmente as perdas que limitam a potência das máquinas e condicionam o valor da indução com que estas trabalham, pelo que o seu conhecimento com relativo rigor é do maior interesse no seu projecto. Nos dentes, o elemento básico para o cálculo das perdas é a distribuição da indução magnética.

O método que expomos permite calcular o campo magnético das máquinas eléctricas com aproximação bastante superior aos métodos mais correntemente usados. É por outro lado relativamente expedito, desde que se disponha de conveniente equipamento experimental.

Os resultados que obtivemos permitem, nalguns casos, um cálculo da relutância magnética e das perdas mais aproximadas da realidade que utilizando os processos correntes de cálculo.

Considerou-se para relação entre os módulos dos vectores campo magnético e indução magnética a curva do gráfico da fig. 5, correspondente a alguns tipos de ferros dos correntemente empregados nos dentes das máquinas eléctricas (1). Analisamos em 9 a possibilidade de generalizar os resultados obtidos a ferros com curvas de saturação diferentes.

---

(1) É de notar que deve considerar-se para os dentes uma característica magnética ponderada, que tenha em conta o factor de empilhamento das chapas, por exemplo, pela forma indicada em 9.

2 Processo corrente para o cálculo da relutância magnética do conjunto entreferro, dentes e cavas, e das perdas magnéticas nos dentes

No processo corrente de cálculo a *relutância do conjunto* é obtida pela adição de uma parcela correspondente à relutância do entreferro e de outra correspondente ao conjunto dentes-cavas.

A *relutância do entreferro* é calculada multiplicando a relutância correspondente a um entreferro uniforme por um coeficiente que tem em consideração a perturbação resultante da existência da cava, perturbação que, normalmente, se supõe depender apenas da relação entre a largura da cava e o entreferro.

Este coeficiente foi estudado por Carter. No caso limite de permeabilidade magnética infinita do ferro, de uma única cava de largura uniforme (b) e profundidade infinita, e de serem planas e indefinidas as superfícies que limitam o entreferro (de espessura d), o campo (fig. 11, variável

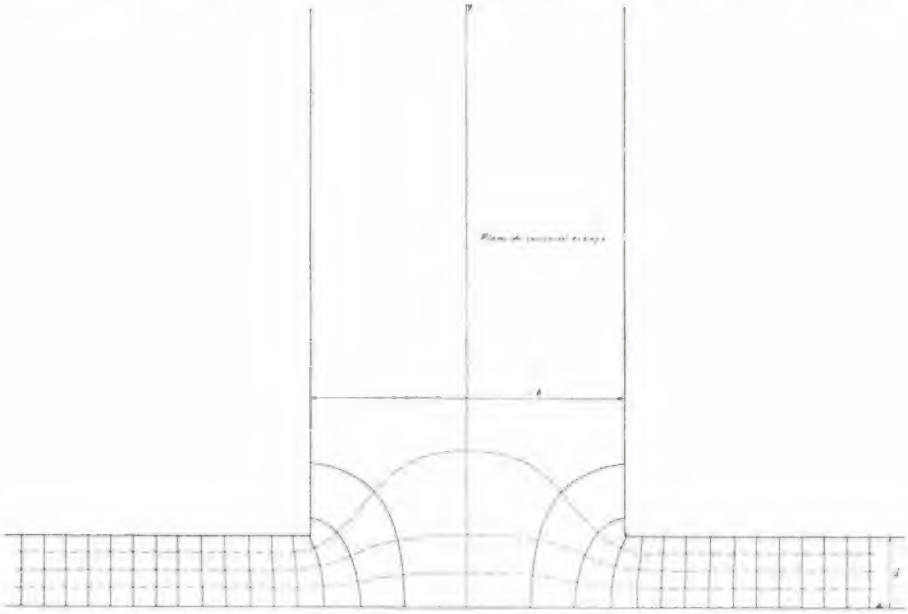


Fig. 11

$z = x + j\,y$) pode ser estudado com o auxílio de uma transformação de Schwarz-Christoffel, que o relaciona com um campo análogo ao campo eléctrico de uma linha bifilar indefinida, de condutores de secção infinitesimal, em regime electrostático, para $v > 0$ (1) (fig. 12, variável $w = u + j\,v$).

A função potencial correspondente a este campo e a função conjugada são, respectivamente, as componente real — W_r — e imaginária — W_i — da função

$$135)\qquad W = W_r + j\,W_i = K \log \frac{\gamma + w}{\gamma - w} = 2\,K \operatorname{arg\,th} \frac{w}{\gamma}\,,$$

sendo

$$136)\qquad \gamma = \frac{b}{\sqrt{b^2 + 4\,d^2}}\,.$$

A relação entre as variáveis z e w pode exprimir-se por

$$137\qquad z = \frac{b}{\pi} \operatorname{arc\,sen} w + \frac{2\,d}{\pi} \operatorname{arg\,sh} \left\{ 2\,d \left[\frac{b^2}{w^2} - (b^2 + 4\,d^2) \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}\,.$$

(1) Vide por exemplo Carter o. cit. .

De (135) e (137) resulta, substituindo, para relação entre z e W

$$138) \quad z = \frac{b}{\pi} \text{ arc sen} \left(\gamma \text{ th} \frac{W}{2K}\right) + \frac{2d}{\pi} \text{ arg sh} \left\{ 2d \left[b^2 \left(\gamma \text{ th} \frac{W}{2K}\right)^{-2} - (b^2 + 4d^2) \right]^{-\frac{1}{2}} \right\}.$$

Plano da variável w-u+jv

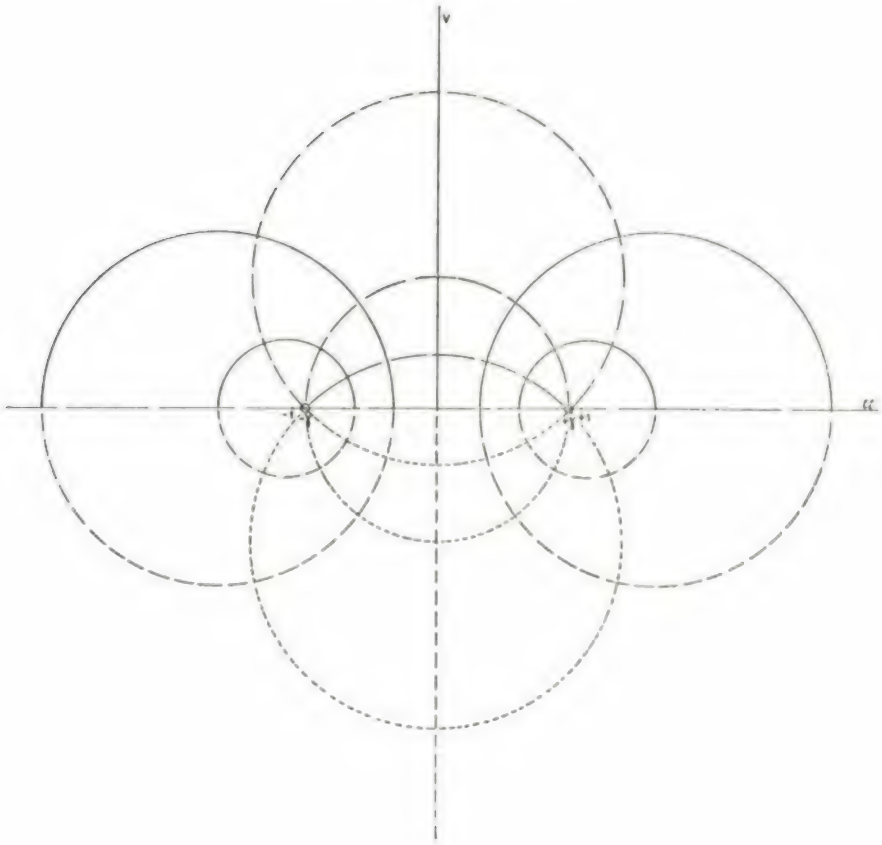


Fig. 12

As componentes imaginária — W_i — e real — W_r — de W são respectivamente a função potencial do campo considerado na cava e entreferro e a função conjugada com esta.

À existência da cava corresponde, em relação à hipótese de um entreferro uniforme de espessura d, uma diminuição do inverso da relutância que é igual ao inverso da relutância associada a um campo uniforme de comprimento d e largura αb, sendo α da forma

$$139) \quad \alpha = \frac{2}{\pi} \left\{ \text{arc tg} \frac{b}{2d} - \frac{d}{b} \log \left[1 + \left(\frac{b}{2d}\right)^2 \right] \right\}.$$

Carter estudou ainda, matemàticamente, o campo correspondente a um entreferro com cavas a distâncias iguais e finitas, e de profundidade indefinida, bem como o campo correspondente a uma única cava, mas de profundidade finita. O cálculo numérico é, nestas hipóteses, bastante laborioso, obtendo-se no entanto, salvo para entreferros da ordem de grandeza da largura dos dentes ou superior, ou para cavas muito pouco profundas, resultados que concordam, com aproximação sobejamente suficiente, com os obtidos a partir de (139).

Os valores dados por (139) são bastante aproximados dos obtidos a partir da expressão

$$140) \quad \alpha' = \frac{\frac{b}{d}}{5 + \frac{b}{d}} ,$$

que é normalmente utilizada, por ser mais cómoda.

Sendo t o passo dos dentes, a relação Γ_0 entre a relutância do entreferro e a correspondente a um entreferro uniforme de espessura d é

$$141) \quad \Gamma_0 = \frac{t}{t - \alpha b} .$$

A *relutância do conjunto dentes e cavas* é calculada pelo integral das relutâncias de troços cilíndricos, concêntricos com a máquina, de espessura elementar, tendo cada troço uma relutância igual à que corresponde a serem equipotenciais as superfícies da coroa cilíndrica elementar. Estas hipóteses de cálculo não são sequer correntes, excepto para dentes e cavas de largura uniforme.

As perdas magnéticas são calculadas tomando como base a variação da indução ao longo do dente, obtida pelo método acima descrito.

3 Processo utilizado para o estabelecimento do análogo eléctrico do conjunto entreferro, dentes e cavas

3.1 *Descrição geral do processo experimental utilizado*

Desprezando, em «primeira aproximação», os efeitos dos topos dos polos e do induzido e dos terminais polares, o campo magnético no entreferro, dentes e cavas pode ser considerado como um campo a duas dimensões, podendo ser estudado por intermédio de um campo eléctrico «análogo» a duas dimensões. Foi o que fizemos, tendo utilizado na generalidade dos ensaios a analogia directa.

Representou-se o entreferro e as cavas (de permeabilidade uniforme) por papel condutor e os dentes por uma rede de resistências, supondo equipotenciais a superfície de separação entre o entreferro e o polo e a superfície do fundo da cava e da base do dente (1), aproximações que são legítimas, ou, pelo menos, permitem ulterior correcção, que não altera as conclusões que obtivemos.

Aproveitámos o facto de os eixos do polo e da cava serem eixos de simetria do campo em estudo, para reduzir o domínio representado pelo modelo.

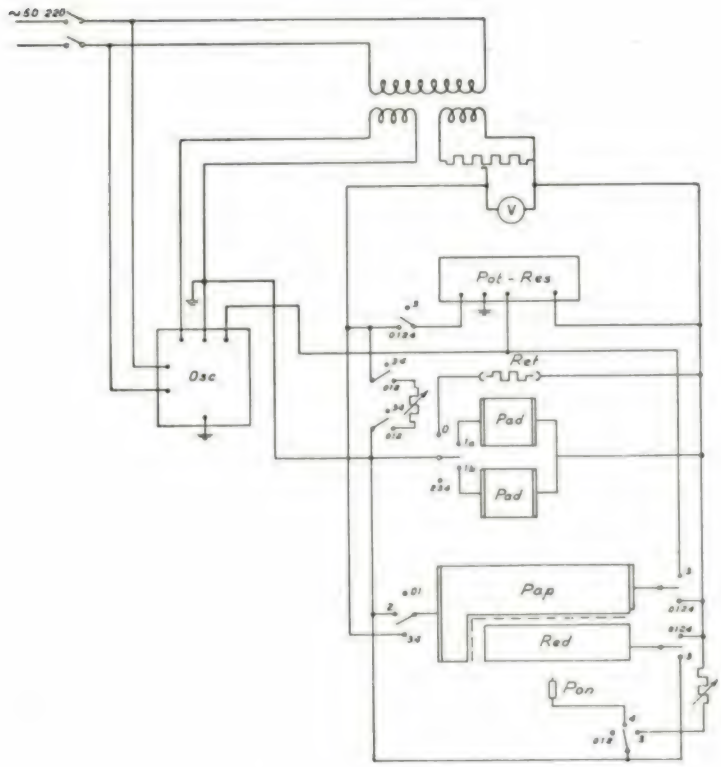
Utilizámos o esquema de ligações indicado na fig. 13 e a montagem representada nas fots. 3 e 4. Por ser relativamente simples, dispensamo-nos da sua justificação detalhada. Utilizámos corrente alternada de frequência industrial.

As resistências e os potenciais foram medidos com uma montagem do tipo ponte de Wheatstone. Usou-se como instrumento de zero um osciloscópio electrónico, que, por ter um tempo de reacção muito curto, é bastante cómodo. Aplicámos entre os terminais correspondentes à componente vertical do movimento do feixe electrónico a tensão cujo anulamento se pretendia verificar e entre os correspondentes à componente horizontal uma tensão alternada de amplitude constante e em fase com a tensão aplicada à ponte ou ao modelo, e portanto também em fase com a tensão que se desejava anular. No alvo do osciloscópio aparece assim um segmento rectilíneo que se comporta como um ponteiro luminoso e que é horizontal quando se verifica o pretendido anulamento de tensão.

Para o traçado de equipotenciais no papel condutor, utilizou-se uma lapiseira ligada elèctricamente a um dos terminais do osciloscópio. As equipotenciais foram traçadas deslocando a lapiseira por forma que o traço luminoso no alvo se mantivesse horizontal.

---

(1) Este problema é analisado mais detalhadamente em 3 2



Pot-Res — Potenciómetro de precisão (0, 1, 2, 4) ou resistência de décadas (3)
Pad — Padrão de papel condutor
Ret — Resistência a medir
Pap — Modelo de papel condutor representando a cava e o entreferro
Red — Rede de resistências representando o dente
Osc — Osciloscópio
Pon — Lapiseira ou terminal

Posição dos comutadores
0 — Medição de resistências
1 — Medição das resistências dos padrões de papel condutor
2 — Medição da resistência do conjunto «entreferro, dente e cava»
3 — Medição da proporção de correntes através do fundo da «cava» e da base do «dente»
4 — Medição de potenciais ou traçado de equipotenciais no papel condutor

Fig. 13

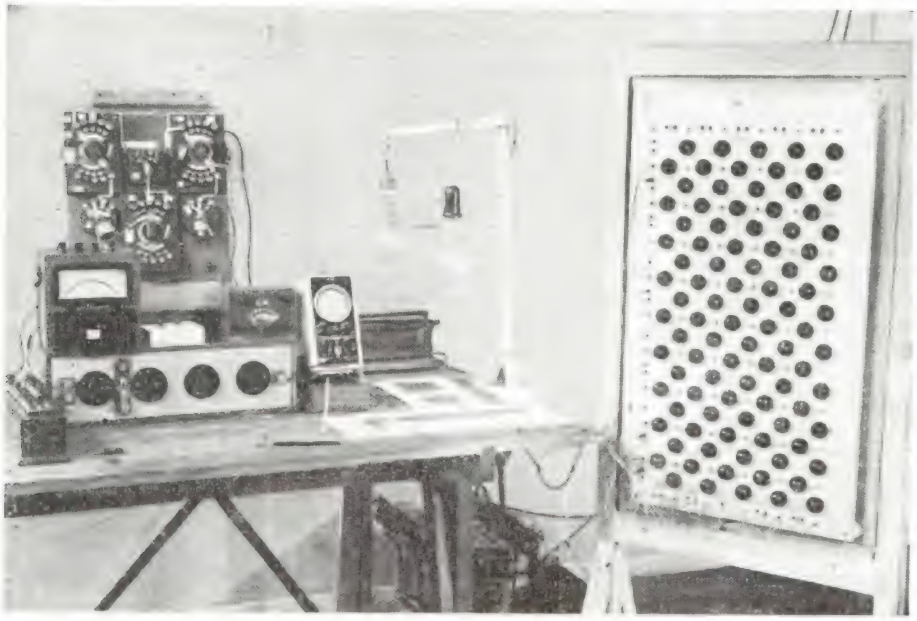
Para a medição de potenciais em pontos determinados, utilizou-se um terminal ligado ao ponto em consideração, variando o ponto médio do potenciómetro por forma a conseguir a horizontalidade da imagem no osciloscópio.

Para a medição de resistências variou-se ou uma das resistências da ponte ou o ponto médio de duas delas, no potenciómetro.

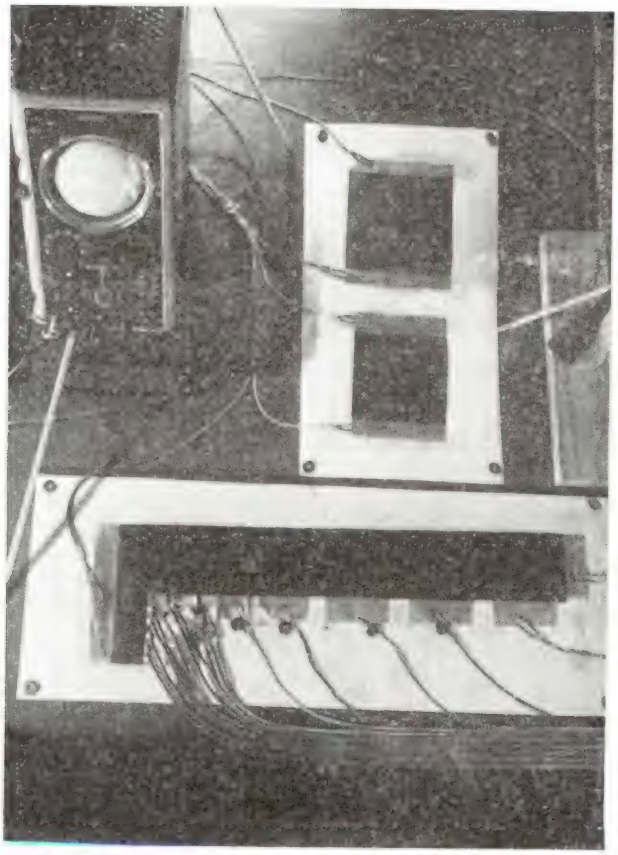
Para a medição da proporção de correntes através do «fundo da cava» e da «base do dente», utilizaram-se duas resistências percorridas por essas correntes e que foram ligadas, por um lado, ao modelo (uma ao «fundo da cava» e outra à «base do dente)», e, pelo outro, a um dos terminais da fonte de tensão. O eléctrodo do modelo correspondente ao polo ligou-se ao outro terminal da ponte. Variou-se a proporção destas duas resistências auxiliares por forma a conseguir o anulamento da diferença de potencial entre os pontos em que estavam ligadas ao modelo. A relação das duas resistências correspondente ao anulamento é igual ao inverso da relação entre as correntes através do «fundo da cava» e da «base do dente».

Fizemos um estudo preliminar referente à forma de ligação da rede ao papel, tendo em conta que, na hipótese de o «dente» não se encontrar saturado, as linhas de força no papel são sensì-

velmente ortogonais à superfície de separação, não o sendo porém na base e zona média do dente, no caso de forte saturação. A partir deste estudo determinaram-se as dimensões mais convenientes para os eléctrodos.



Fot. 3



Fot. 4

Seja o modelo representado na fig. 14, figurando as resistências os troços do dente esquematizados na fig. 15.

Mede-se a resistência padrão, e a resistência do modelo de papel com todos os eléctrodos para ligação à rede e eléctrodo relativo ao fundo da cava curto-circuitados, e calcula-se a resistividade do papel. Arbitra-se a resistividade por exemplo na base do dente e, por comparação com o resultado obtido para uma forma semelhante deste, estabelece-se uma distribuição de resistividades. Pela forma indicada no cap. I, em 2.3, calculam-se os valores correspondentes das resistências.

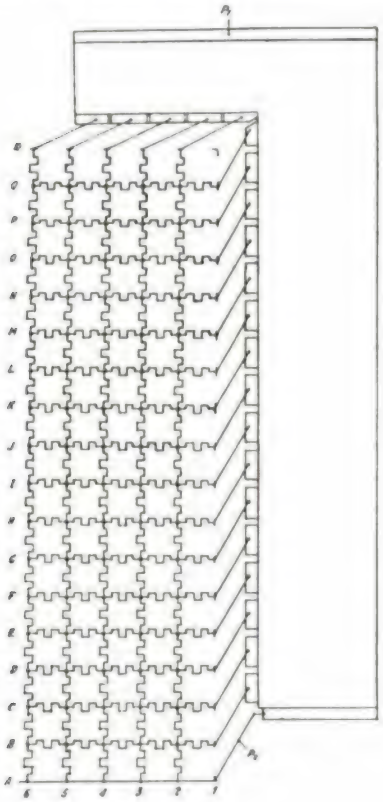


Fig. 14

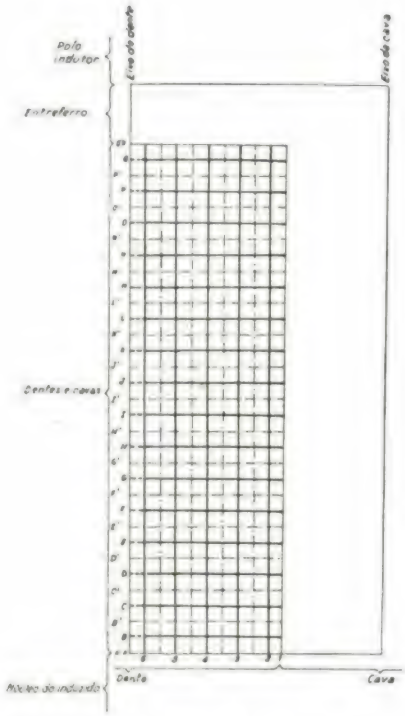


Fig. 15

Medem-se:

a) Os potenciais nos pontos (1 ; X) e (2 ; X) (1) ;

b) A proporção de correntes (fluxos) através da base do dente e do fundo da cava;

c) A resistência R equivalente ao conjunto «entreferro, dente e cava».

Registam-se os valores das resistências (1-2 ; X).

A corrente em (1-2 ; X) é

$$142) \qquad i_X = \frac{\Delta V_X}{R_X} \quad (2) \quad ,$$

sendo ΔV_X a diferença entre os potenciais nos pontos (1 ; X) e (2 ; X) e R_X a resistência (1-2 ; X).

Sendo I_b e I_c respectivamente as correntes através da base do dente e do fundo da cava, é

$$143) \qquad I_b = \frac{V}{R} \cdot \frac{I_b}{I_b + I_c} \quad ,$$

sendo V a tensão entre P_2 e P_1.

(1) Representamos genèricamente por X as letras B, . . . , R.

(2) Considera-se i como grandeza algébrica.

Portanto

$$144) \quad \frac{i_X}{I_b} = \Upsilon \frac{\frac{\Delta V_X}{V}}{R_X} ,$$

sendo

$$145) \quad \Upsilon = R \, . \, \frac{I_b + I_c}{I_b} .$$

As correntes (fluxos) através das sucessivas secções do dente, perpendiculares ao eixo deste, são

$$146) \quad \begin{cases} I_{A'} = I_b \\ I_{B'} = \left(1 - \frac{i_B}{I_b} \right) I_b \\ I_{C'} = \left(\frac{I_{B'}}{I_b} = \frac{i_C}{I_b} \right) I_b \\ I_{D'} = \left(\frac{I_{C'}}{I_b} = \frac{i_D}{I_b} \right) I_b \, . \\ \quad . \quad . \quad . \end{cases}$$

Sendo a largura do dente uniforme, e r uma secção genérica, é

$$147) \quad \frac{B_r}{B_b} = \frac{I_r}{I_b} ,$$

sendo B_r o valor médio da componente radial de **B** na secção r e B_b o valor médio da componente radial de **B** na base do dente.

Na hipótese de secção do dente variável é

$$148) \quad \frac{B_r}{B_b} = \frac{I_r}{I_b} \, . \, \frac{S_b}{S_r} ,$$

sendo S_r a área da secção r do dente e S_b a secção da base do dente.

Em geral, excepto no canto do dente, pode-se, para efeito do cálculo da permeabilidade, supor $B = B_r$. Assim sendo, a partir do valor de B_r determina-se o valor médio do inverso da permeabilidade (resistividade) na secção r, e a partir dele calculam-se as resistências a colocar na rede, em nova aproximação.

A variação de permeabilidade numa mesma secção do dente é pequena, excepto na vizinhança do canto, tendo influência desprezável na resistência total. Pode determinar-se uma nova aproximação desta variação a partir dos valores do campo **E** numa mesma secção transversal obtidos na distribuição da aproximação anterior.

Fizeram-se alguns ensaios para averiguar a convergência do método. Arbitrando a primeira distribuição por comparação com os resultados obtidos numa forma semelhante do dente, é em geral suficiente uma aproximação para determinar com rigor satisfatório a resistência do conjunto, e até uma ordem de grandeza da distribuição de permeabilidades magnéticas.

3.2 *Análise do erro resultante de supor equipotenciais, no «análogo» eléctrico, a «base do dente» e o «fundo da cava»*

Fizeram-se ensaios para verificar se era legítimo supor equipotenciais a «base do dente» e o «fundo da cava».

No caso de a permeabilidade do dente ser uniforme e muito elevada, esta hipótese afasta-se notòriamente da realidade. Como, porém, a relutância do dente é muito pequena, o erro cometido, no que respeita ao cálculo da relutância magnética, é pràticamente desprezável. Com papel condutor obtiveram-se as equipotenciais representadas na fig. 16 (campo análogo do campo magnético em causa), tendo-se imposto os potenciais das equipotenciais 0 e 1. Na hipótese de permeabilidade uniforme e muito elevada, este campo pode ser estudado analìticamente, com o auxílio de uma transformação de Schwarz-Christoffel, que o reduz a um campo análogo ao campo eléctrico de um condutor linear indefinido (1). Considerando as condições limites representadas na fig. 17, tem-se

$$149)\quad z = \frac{1}{2\pi}\left[t \arg\cosh \frac{8\, e^{kW} - (t^2 + p^2)}{t^2 - p^2} - p \arg\cosh \frac{2\,(t^2 + p^2)\, e^{kW} - p^2 t^2}{z\,(t^2 - p^2)\, e^{kW}} \right],$$

sendo

$$150)\quad W = W_r + j\, W_i\,,$$

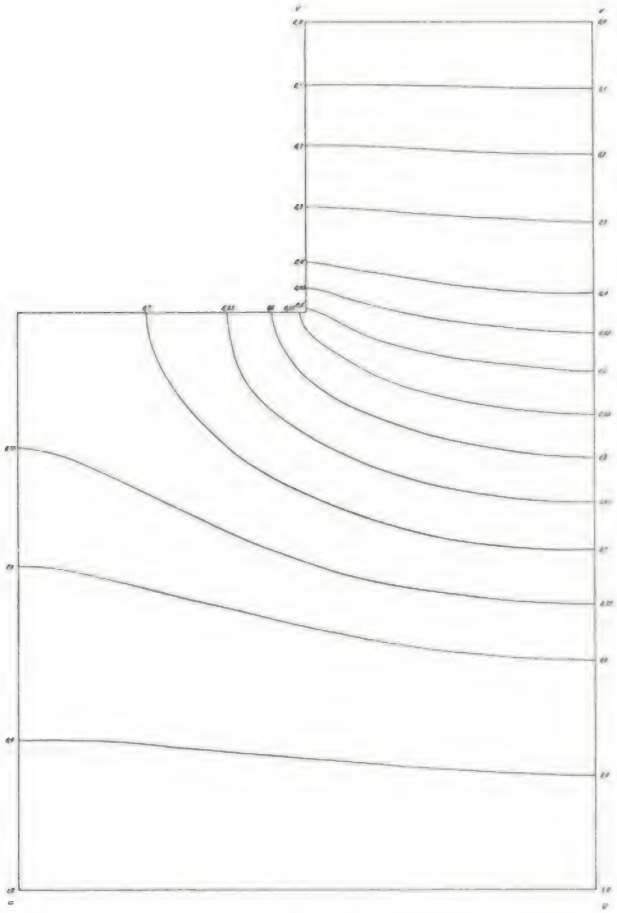


Fig. 16

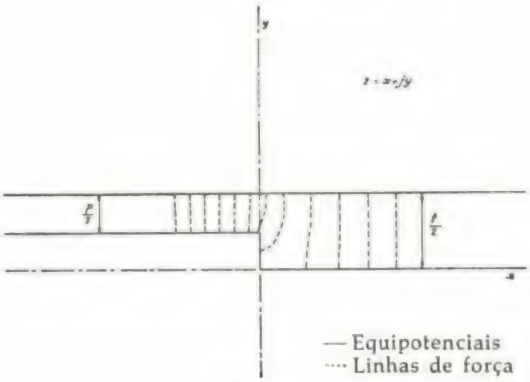
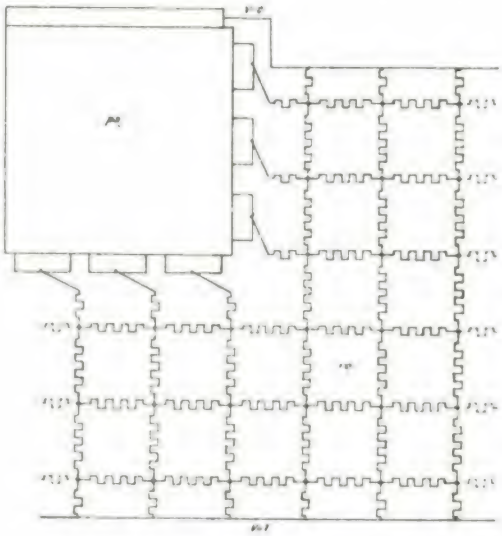


Fig. 17



pa — Papel condutor
re — Rede de resistências

Fig. 18

e sendo W_r a função potencial do campo eléctrico considerado e W_i a função conjugada. Portanto W_i e W_r serão respectivamente a função potencial do campo magnético e a função conjugada.

Para estudar o campo na região de ligação do dente ao induzido, na hipótese de forte saturação, considerou-se um modelo, representado esquemàticamente na fig. 18, figurando a região da base do dente. Neste modelo o papel condutor representa a cava e a rede o ferro.

(1) Vide por exemplo Carter, o. cit..

Para $\frac{\mu_0}{\mu} = 0{,}08$ na região do «ferro» correspondente à equipotencial $V = 0$, e para $b = p$, obteve-se o campo representado por algumas equipotenciais na fig. 19. A resistência do conjunto, entre as equipotenciais correspondentes a $V = 0$ e $V = 1$ é a correspondente a um campo do tipo do representado na fig. 20-b, sendo a permeabilidade do «ferro» uniforme e igual à que, no modelo correspondente à fig. 20-a, se verifica no «ferro» na região de equipotencial $V = 0$, e sendo

151) $l_1 \cong l + 0{,}06\, p$.

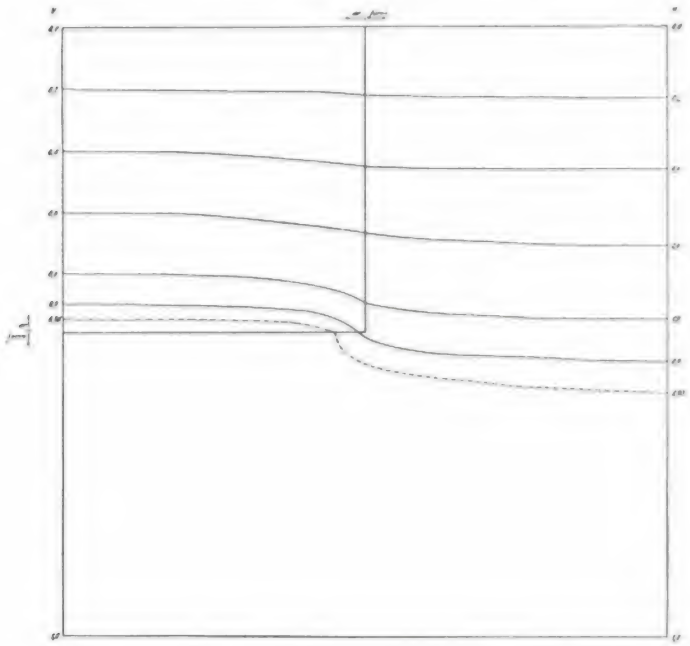


Fig. 19

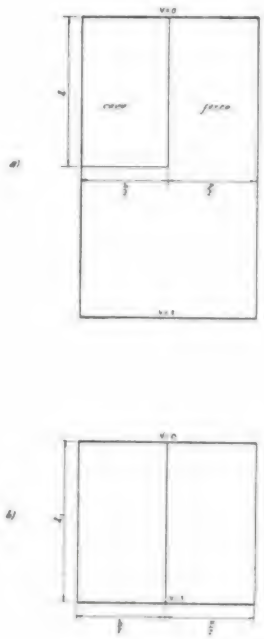


Fig. 20

No caso de forte saturação, para as dimensões que considerámos nos ensaios referidos em 4, a relutância do conjunto — entreferro, cavas, dentes e região vizinha do induzido — é cerca de 1 % superior à relutância do conjunto — entreferro, cavas e dentes — na hipótese de a base do dente e o fundo da cava serem equipotenciais. O pequeno valor desta diferença pode ser interpretado como associado:

a) A uma pequena diminuição da indução média na secção do dente na região da base, a que corresponde uma diminuição sensível do campo magnético médio;

b) Ao facto de, a muito pequena distância da base do dente, ser muito reduzido o campo H, dada a elevada elasticidade de H em relação a B em condições de saturação.

3.3 *Exemplos de aplicação do método experimental*

Nas figs. 21 e 22, representam-se as distribuições do campo (figurado por diversas curvas equipotenciais) obtidas no modelo, pelo processo descrito em 3.1. As equipotenciais no papel (entreferro e cava) são obtidas directamente sobre o papel condutor, pelo processo já descrito, com uma lapiseira ligada eléctricamente a um ponto do circuito que esteja ao potencial correspondente (esquema da fig. 13). As equipotenciais no dente (rede de resistências) foram obtidas por interpolação entre os potenciais nos nós da rede. As linhas de força podem obter-se atendendo a que são ortogonais às equipotenciais.

A configuração do campo traduzida nestas figuras permite interpretar qualitativamente os resultados obtidos na generalidade dos ensaios, bem como as principais causas de erro dos processos habituais de cálculo.

A forma por que as hipóteses em que se baseiam os processos correntes de cálculo se afastam dos campos obtidos é por demais evidente para que seja necessário acentuá-la. A principal causa de

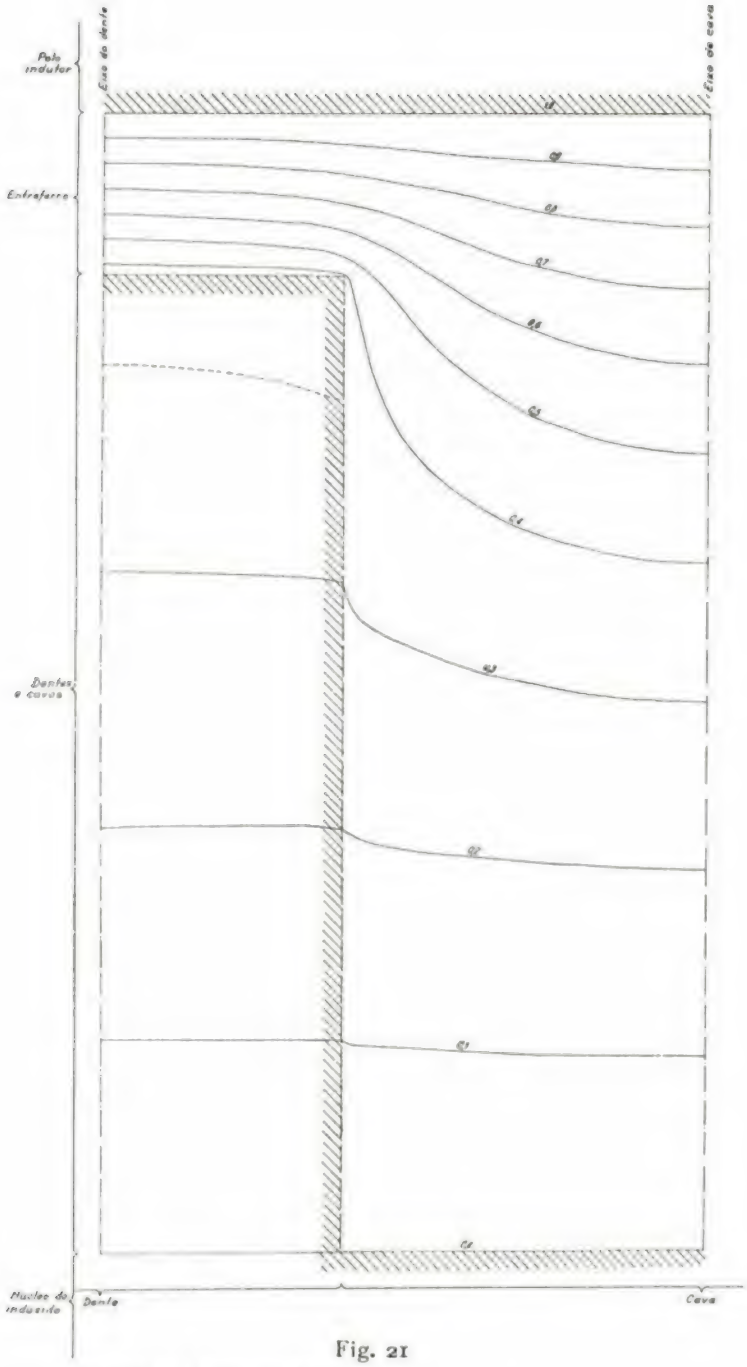


Fig. 21

Largura do dente uniforme

Revistividade na base $\simeq 200\ \Omega \left(\frac{\mu_0}{\mu} \simeq 0{,}08\right)$

erro do processo habitual é não ter em conta o fluxo que, em virtude da não uniformidade do entreferro, se fecha entre a região do polo correspondente à cava e a face lateral do dente. Há assim uma diminuição de fluxo na região do topo, a que, dada a grande elasticidade de H em relação a B, pode corresponder uma variação muito apreciável da relutância magnética do conjunto.

3.4 *Simplificação do método experimental*

O método descrito em 3.1 permite obter, à custa do aumento do número de malhas, a aproximação quese pretender, no que respeita não só à relutância magnética como também ao valor local

do campo, e, para uma forma concreta de dentes e cavas, sem qualquer sujeição a condicionamentos geométricos. É fàcilmente aplicável, desde que se disponha do material necessário. Procurámos no entanto obter um método mais expedito e que se prestasse para um estudo sistemático de diversas formas de dentes e cavas, tendo conseguido estabelecer um método que, no que respeita à relutância magnética, e mesmo à ordem de grandeza do valor local do campo, conduz a resultados suficientemente aproximados, e bastante mais rigorosos que o processo de cálculo corrente.

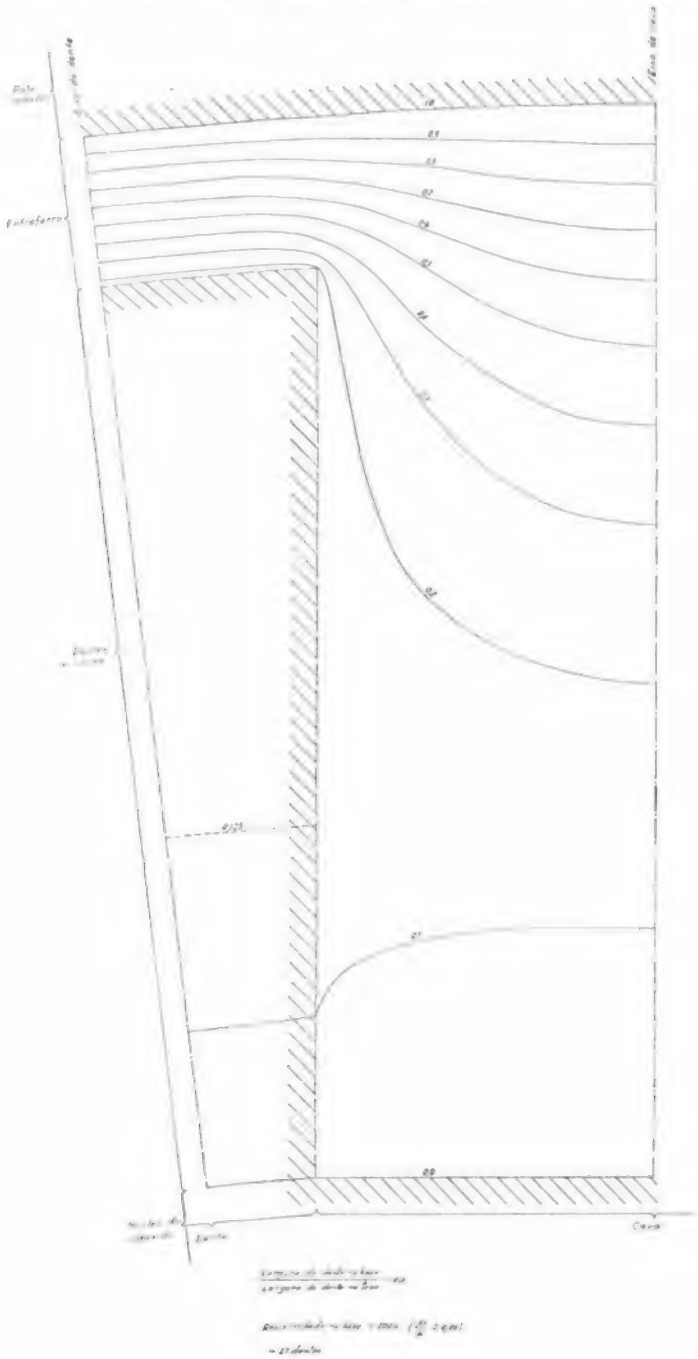


Fig. 22

Considere-se o campo em estudo, e o modelo descrito em 3.1 (figs. 15 e 21).

Sendo o campo no dente dominantemente radial, não há alteração apreciável nos potenciais dos diversos pontos se se anularem as resistências na direcção II (fig. 15), ficando-se apenas com

uma série de resistências na direcção I, ligadas ao papel (fig. 23). Para determinar a distribuição de corrente ao longo do dente, e por ser pequena a sua variação, mediu-se a corrente através das várias ligações ao papel. Para este fim substituia-se a ligação percorrida pela corrente que se pretendia medir por uma pequena resistência, da ordem da dezena de ohm (1), determinando-se o potencial nos seus terminais. Esta resistência era muito inferior à resistência correspondente ao filete de corrente respectivo, não sendo a distribuição de correntes sensìvelmente afectada.

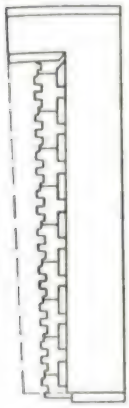


Fig. 23

A partir dos valores obtidos para a corrente nas várias secções do dente, determinou-se, em nova aproximação, o valor da resistividade, por processo análogo ao descrito em 3.1.

Por este método não é possível ter em conta a concentração de fluxo que se dá no canto do dente, que, aliás, tem um carácter local, não afectando sensìvelmente os valores globais, e que, mesmo no aspecto local, é apreciável apenas numa pequena vizinhança do canto. Além disso, o efeito desta concentração pode ser ulteriormente considerado.

Utilizou-se o esquema indicado na fig. 24, que, com uma associação e disposição adequada dos comutadores, permite efectuar com relativa rapidez as diversas medições necessárias.

Procedemos a ensaios para verificar a legitimidade desta simplificação. No gráfico da fig. 25 mostramos os resultados obtidos para uma dada configuração do dente, bem como os valores obtidos pelo processo corrente de cálculo, no que respeita à relação Γ entre a relutância do conjunto entreferro, dentes e cavas e a de um entreferro uniforme de espessura d, expressa em função de B_{tm}, valor médio da componente radial da indução magnética ao nível do topo dos dentes.

Nos gráficos das figs. 26 e 27 apresentam-se valores obtidos com os dois métodos:

a) Para a resistividade média em secções do «dente» ortogonais ao seu plano médio, tomando como unidade a resistividade na base, em função da distância τ da secção à base, tomando como unidade a altura do «dente»;

b) Para a relação entre a componente radial média da indução magnética na secção do dente perpendicular ao seu eixo e a componente radial média na base $\left[\frac{B_r}{B_b}\right]$, em função de τ.

A concordância dos dois métodos é manifesta.

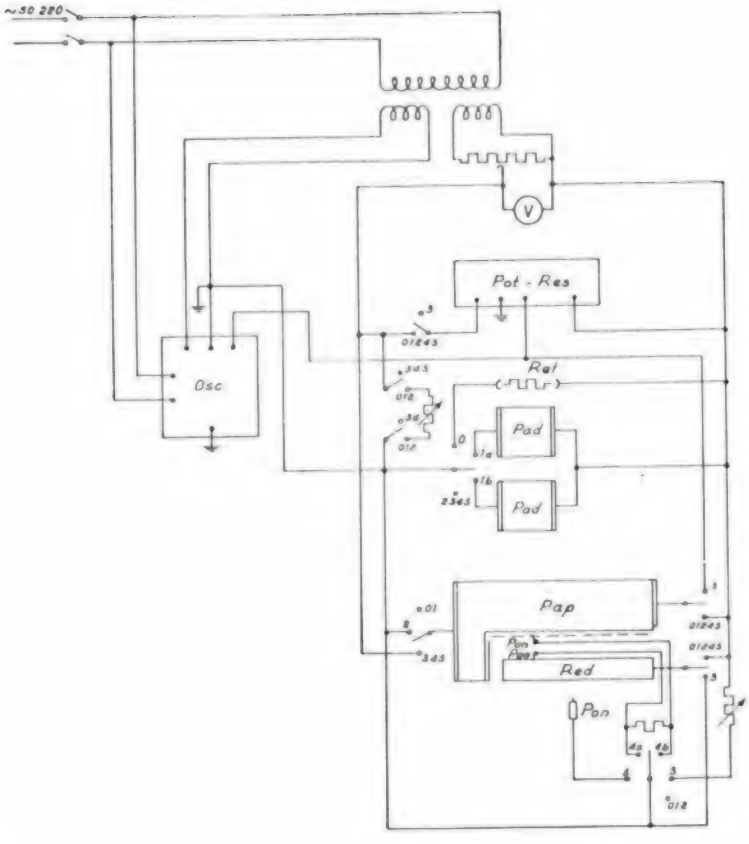
4 Ensaios efectuados

A fim de estabelecermos um plano fizemos alguns ensaios prévios para determinar a ordem de grandeza da variação das grandezas em jogo. Pretendeu-se, com um número de ensaios não muito elevado, tirar conclusões abrangendo uma amplitude máxima de variação dos diversos parâmetros. Com alguns desses ensaios estudámos especialmente a legitimidade de interpolar os resultados obtidos.

Por estudo prévio fomos levados a utilizar seis folhas de papel condutor — cada folha para três formas de cava, por variação de $\frac{b}{2}$, cortando o papel (fig. 28). Conseguiu-se assim não só consumir pouco papel, de difícil obtenção, como utilizar para um número elevado de ensaios os mesmos eléctrodos, o que representou sensível economia de tempo.

Nas formas ensaiadas as cavas eram de secção rectangular, e planos o topo do dente e a superfície do polo. Para cada configuração do papel consideram-se resistências, representando duas formas do dente — uma rectangular (fig. 29) e outra trapezoidal (fig. 30), de largura, na base, metade da largura do topo. Para esta última há um erro, na forma do topo do dente e entreferro (fig. 31). Este erro é bastante pequeno e foi pràticamente eliminado com uma correcção aditiva.

(1) A resistividade do papel é da ordem de 2 500 Ω.



Pot-Res — Potenciómetro de precisão (0, 1, 2, 4, 5) ou resistência de décadas (3)
Pad — Padrão de papel condutor
Ret — Resistência a medir
Pap — Modelo de papel condutor representando a cava e o entreferro
Red — Série de resistências representando o dente
Osc — Osciloscópio
Pon — Lapiseira ou terminal
Pan — Terminais para a medição da corrente nas ligações da rede (série) de resistências ao papel condutor

Posição dos comutadores
0 — Medição de resistências
1 — Medição das resistências dos padrões de papel condutor
2 — Medição da resistência do conjunto «entreferro, dente e cava»
3 — Medição da proporção de correntes através do fundo da «cava» e da base do «dente»
4 — Medição da corrente nas ligações da rede (série) de resistências ao papel condutor
5 — Medição de potenciais ou traçado de equipotenciais no papel condutor

Fig. 24

Para cada configuração geométrica fizeram-se ensaios correspondentes às seguintes condições:

a) Permeabilidade infinita;

b) Permeabilidade uniforme $\left(\frac{\mu_0}{\mu} \simeq 0{,}01\right)$ (apenas para os dentes de largura uniforme);

c) Base do dente medianamente saturada $\left(\frac{\mu_0}{\mu} \simeq 0{,}04\right)$;

d) Base do dente fortemente saturada $\left(\frac{\mu_0}{\mu} \simeq 0{,}08\right)$.

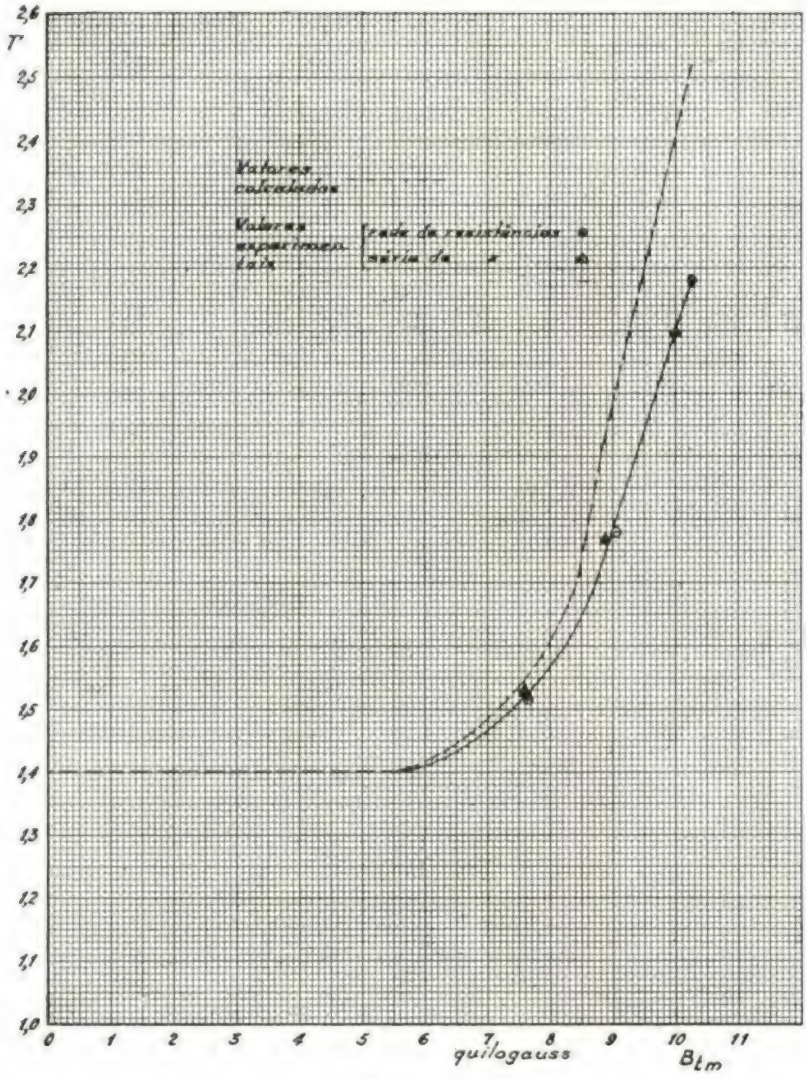


Fig. 25

Foram utilizadas seis folhas de papel com as seguintes dimensões, comuns a todas as formas de dente e cava figurados por uma mesma folha:

$\frac{h}{a}$	$\frac{a}{d}$
2	3
2	4,5
2	6
3	3
3	4,5
3	6

Com cada folha de papel consideram-se para $\frac{b}{a}$ os valores: 1,5; 1,0; 0,5.

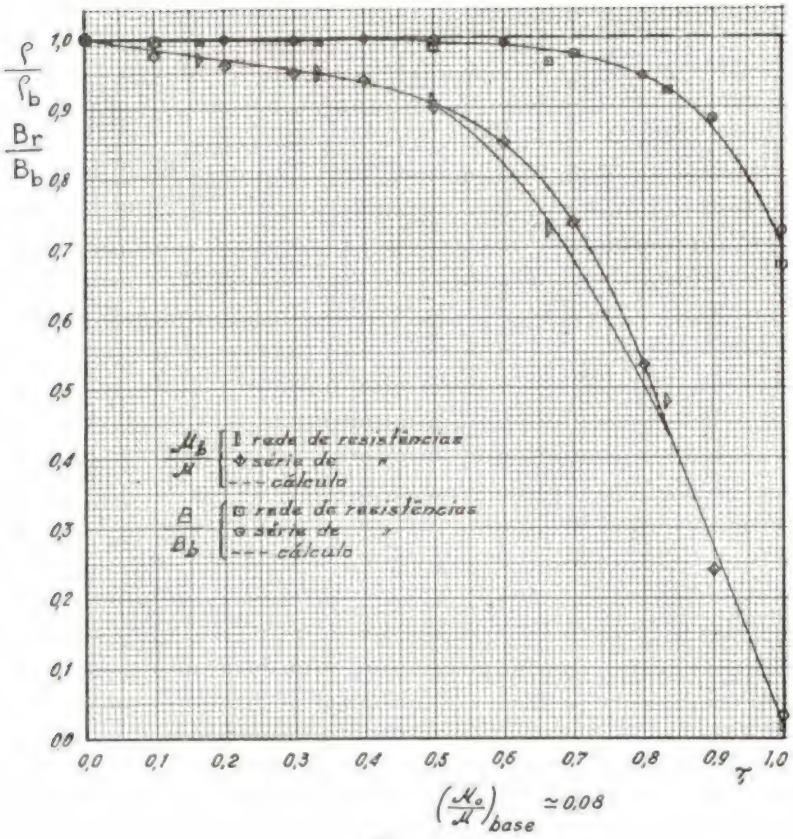

ρ/ρb
Br/Bb
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0
τ
μb/μ
rede de resistências
série de "
cálculo
B/Bb
rede de resistências
série de "
cálculo
(μo/μ)base ≃ 0,08

Fig. 26

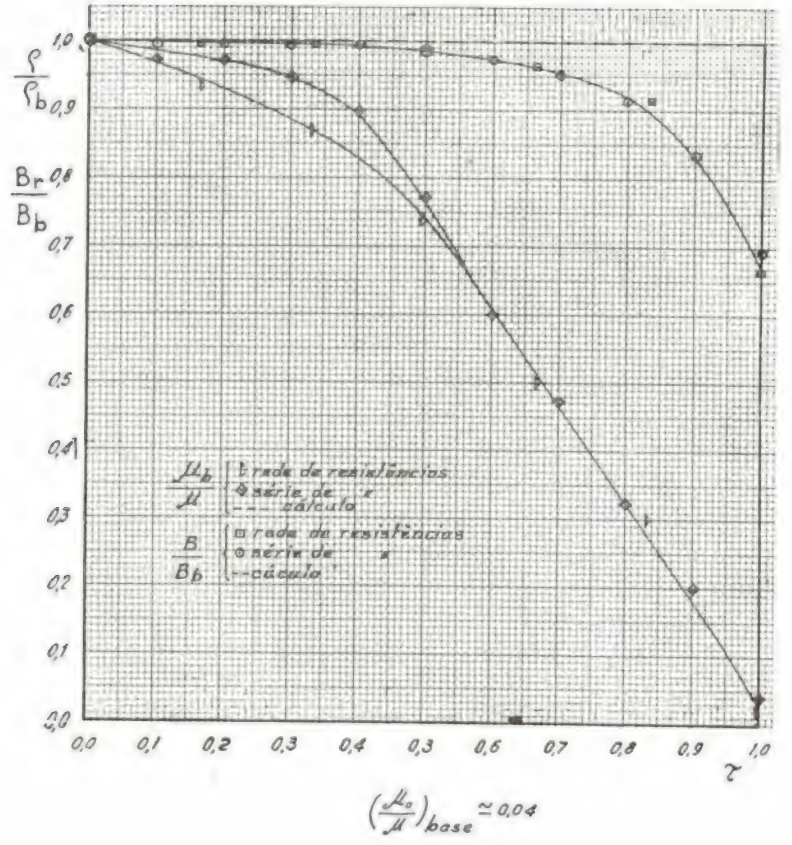

ρ/ρb
Br/Bb
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0
τ
μb/μ
rede de resistências
série de "
cálculo
B/Bb
rede de resistências
série de "
cálculo
(μo/μ)base ≃ 0,04

Fig. 27

JAYME DA COSTA, L^DA

MECÂNICA E ELECTRICIDADE EM TODAS AS APLICAÇÕES

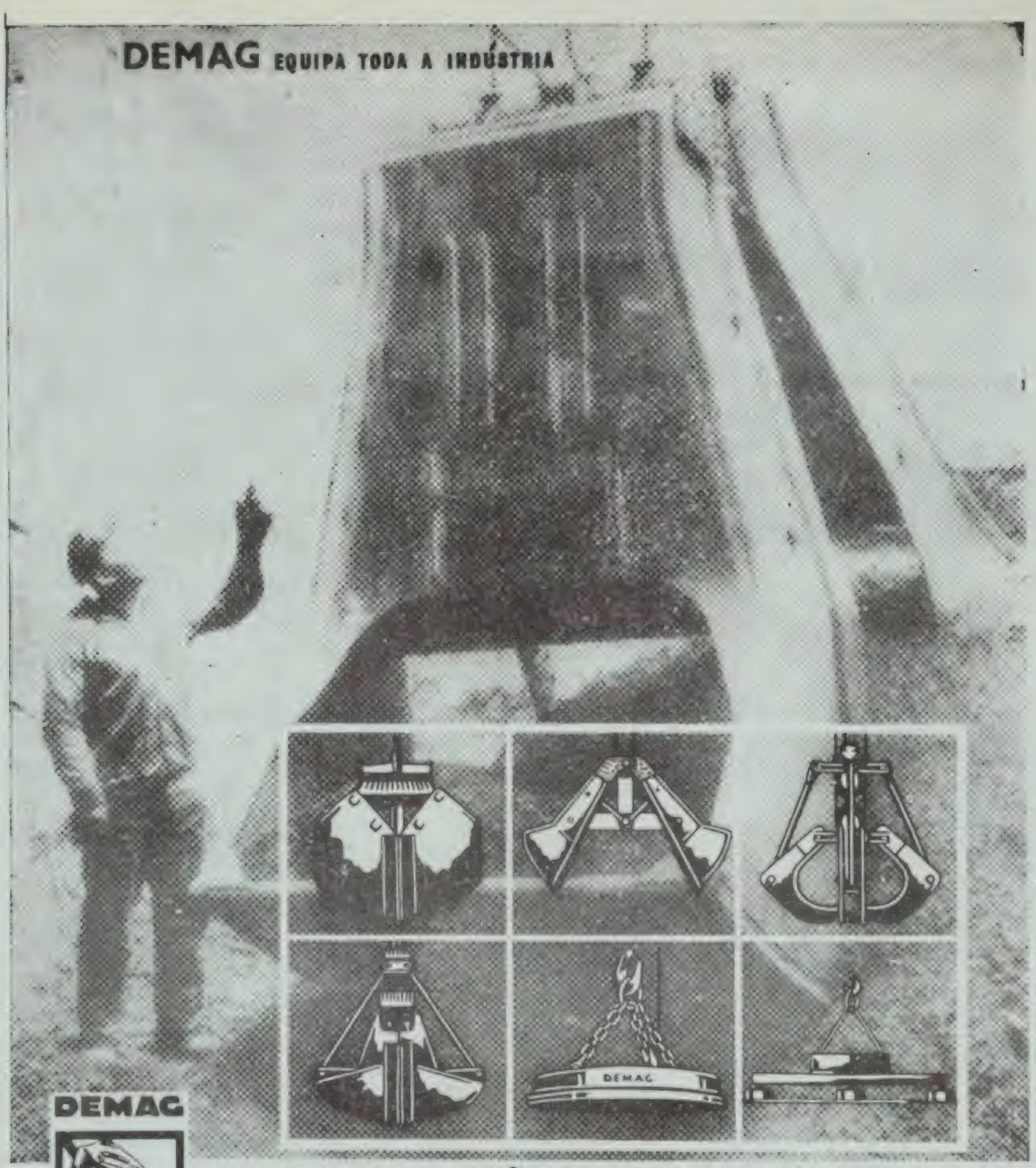
PORTO
Praça da Batalha, 12
Telef. 2 28 12 (PPC)

LISBOA
Rua dos Correeiros, 14
Telef. 32 70 35 (PPC)

LUANDA
Cx. Postal 5174
Telef. 4743

Material fabricado nas nossas oficinas, pronto para expedição

- Fabricação de aparelhagem eléctrica de alta e baixa tensão
- Equipamentos electromecânicos completos para centrais e fábricas
- Postos de transformação tipo monobloco
- Quadros blindados, capsulados e em armário
- Armaduras de iluminação de todos os tipos
- Contadores eléctricos e instrumentos de medida
- Telemedida e telecomando
- Instalações elevatórias de água
- Instalações de saneamento e esgotos
- Ferramentas de corte
- Motores Diesel industriais e marítimos
- Fogões eléctricos
- Frigoríficos
- Ventilação e condicionamento de ar
- Aparelhagem de Raios X e electromedicina



DEMAG

Aparelhos de elevação DEMAG

SIMPLIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE CARGA

Obter a capacidade máxima dum sistema de carga num só ciclo de trabalho, é um dos factores decisivos para a rentabilidade da manutenção.

O programa da DEMAG-ZUG oferece-vos sistemas de carga apropriados para toda a espécie de materiais, os quais permitirão utilizar ao máximo a capacidade dos vossos engenhos de manutenção. Isto só é possível graças à vantajosa relação entre a carga útil e o pêso próprio das colheres e das colheres de mandíbulas e ainda à grande força atractiva e pêso reduzido dos electro-imans de elevação.

Frequentemente as múltiplas possibilidades dos sistemas de carga, na manutenção interna, passam-nos desapercebidas.

Consulte os nossos engenheiros sobre este problema. Estamos sempre ao vosso dispôr.

ROMAR
UMA ORGANIZAÇÃO AO SERVIÇO DA INDÚSTRIA

LISBOA
Rua da Boa Vista, 81-C - 83-E
Tel. PPC 672161/2/3/4/5

PORTO
Rua Sá da Bandeira, 589
Tel 25871

LOURENÇO MARQUES
Av. Manuel de Arriaga, 55-1.º
Tel 5214

LUANDA
Largo da República, 29
Tel. 4492

Os ensaios efectuados sistemàticamente abrangeram pois 36 formas de dente, correspondendo-lhes, para os estados de saturação considerados, 108 ensaios. Arbitrando a primeira distribuição de resistências por comparação com os resultados obtidos para formas semelhantes, foi possível, em parte dos casos, obter resultados bastante precisos, com uma única aproximação. O rigor destes resultados foi avaliado em face da resistência do conjunto, pelo que os valores dos campos, que aliás se referem às leituras que levaram à última distribuição de resistências e não às correntes que se verificaram depois de efectuada a última correcção destas, devem ser considerados relativamente grosseiros.

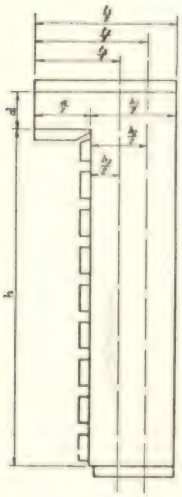


Fig. 28

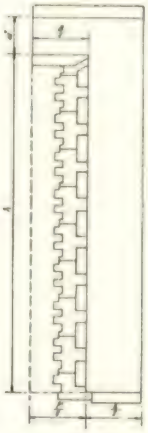


Fig. 29

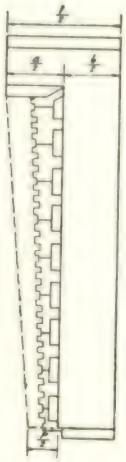


Fig. 30

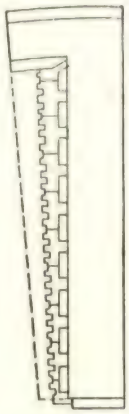


Fig. 31

5 Resultados obtidos experimentalmente para a relutância do conjunto entreferro, dentes e cavas, Comparação com os valores obtidos pelo processo corrente de cálculo

Na tabela I indicam-se os resultados obtidos para a relação Γ (1). Nos gráficos das figs. 32 a 37 representam-se as curvas obtidas a partir desses valores e do processo habitual de cálculo. Da sua simples observação ressaltam as seguintes conclusões genéricas:

A) Para

$$\frac{p}{a} = 1 :$$

1.°) Para saturações apreciáveis os processos normais de cálculo conduzem a valores por excesso sendo este bastante sensível, mesmo no que respeita à relutância do conjunto entreferro, dentes e cavas;

2.°) A diferença entre os valores experimentais e os valores calculados é tanto maior quanto maior a relação $\frac{b}{a}$. Para estados de saturação do dente similares é tanto mais sensível a variação de fluxo quanto maior for aquela relação. Dado que para elevadas saturações a elasticidade de $\frac{\mu_0}{\mu}$ em relação a B é muito elevada, era de prever que o erro do processo normal de cálculo, que não tem em conta o efeito desta «fuga» de fluxo ao longo do dente, conduzisse a resultados por excesso, sendo o erro função crescente de $\frac{b}{a}$.

(1) Definida em 3.4.

TABELA I

$\frac{h}{a}$	$\frac{a}{d}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{a}{b}$	B_{tm} quilogauss	Γ
2	3	0,5	0,5	*	1,08
»	»	»	0,5	7,28	1,15
»	»	»	0,5	8,07	1,23
»	»	»	1,0	*	1,08
»	»	»	1,0	12,51	1,16
»	»	»	1,0	14,40	1,35
»	»	»	1,0	15,97	1,69
»	»	1,0	0,5	*	1,22
»	»	»	0,5	5,50	1,30
»	»	»	0,5	6,20	1,42
»	»	»	1,0	*	1,23
»	»	»	1,0	9,45	1,33
»	»	»	1,0	11,00	1,52
»	»	»	1,0	12,38	1,95
»	»	1,5	0,5	*	1,39
»	»	»	0,5	4,50	1,51
»	»	»	0,5	5,20	1,65
»	»	»	1,0	*	1,40
»	»	»	1,0	7,59	1,53
»	»	»	1,0	8,89	1,77
»	»	»	1,0	10,01	2,10
»	4,5	0,5	0,5	*	1,11
»	»	»	0,5	7,21	1,21
»	»	»	0,5	8,06	1,33
»	»	»	1,0	*	1,11
»	»	»	1,0	12,51	1,24
»	»	»	1,0	14,33	1,57
»	»	»	1,0	15,82	2,04
»	»	1,0	0,5	*	1,30
»	»	»	0,5	5,44	1,42
»	»	»	0,5	6,19	1,62
»	»	»	1,0	*	1,31
»	»	»	1,0	9,44	1,47
»	»	»	1,0	11,01	1,83
»	»	»	1,0	12,33	2,38
»	»	1,5	0,5	*	1,52
»	»	»	0,5	4,41	1,68
»	»	»	0,5	5,09	1,92
»	»	»	1,0	*	1,53
»	»	»	1,0	7,65	1,74
»	»	»	1,0	9,03	2,13
»	»	»	1,0	10,31	2,76

a largura do dente no topo
b largura da cava
d entreferro
h altura do dente
p largura do dente na base
B_{tm} valor médio da componente radial da indução magnética ao nível do topo do dente
Γ Relação entre a relutância do conjunto entreferro, dentes e cavas e a de um entreferro uniforme de espessura d
* relutância do ferro desprezável

TABELA I (Cont.)

$\frac{h}{a}$	$\frac{a}{d}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{p}{a}$	Btm quilogauss	Γ
2	6	0,5	0,5	*	1,14
»	»	»	0,5	7,26	1,28
»	»	»	0,5	8 21	1,50
»	»	»	1,0	*	1,14
»	»	»	1,0	12,72	1,33
»	»	»	1,0	14,48	1,79
»	»	»	1,0	16,02	2 48
»	»	1,0	0,5	*	1,36
»	»	»	0,5	5,49	1,54
»	»	»	0,5	6,37	1,87
»	»	»	1,0	*	1,37
»	»	»	1,0	9,56	1,61
»	»	»	1,0	11,14	2,19
»	»	»	1,0	12,61	3,05
»	»	1,5	0,5	*	1,62
»	»	»	0,5	4,45	1,85
»	»	»	0,5	5,20	2,20
»	»	»	1,0	*	1,63
»	»	»	1,0	7,70	1,94
»	»	»	1,0	9,07	2,47
»	»	»	1,0	10,41	3,34
3	3	0,5	0,5	*	1,08
»	»	»	0,5	7,23	1,17
»	»	»	0,5	8,19	1,34
»	»	»	1,0	*	1,08
»	»	»	1,0	12,40	1,20
»	»	»	1,0	14,30	1,52
»	»	»	1,0	15,63	1,91
»	»	1,0	0,5	*	1,23
»	»	»	0,5	5,44	1,36
»	»	»	0,5	6,34	1,58
»	»	»	1,0	*	1,23
»	»	»	1,0	9,36	1,37
»	»	»	1,0	10,93	1,74
»	»	»	1,0	12,16	2,31
»	»	1,5	0,5	*	1,39
»	»	»	0,5	4,36	1,52
»	»	»	0,5	5,21	1,77
»	»	»	1,0	*	1,40
»	»	»	1,0	7,59	1,57
»	»	»	1,0	8,96	2,06
»	»	»	1,0	10,48	2,76

* Relutância do ferro desprezável

TABELA I (Cont.)

$\frac{h}{a}$	$\frac{a}{d}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{a}{d}$	B_{tm} quilogauss	Γ
3	4,5	0,5	0,5	*	1,11
»	»	»	0,5	7,27	1,24
»	»	»	0,5	8,26	1,53
»	»	»	1,0	*	1,11
»	»	»	1,0	12,57	1,31
»	»	»	1,0	14,42	1,80
»	»	»	1,0	15,89	2,52
»	»	1,0	0,5	*	1,31
»	»	»	0,5	5,49	1,47
»	»	»	0,5	6,32	1,80
»	»	»	1,0	*	1,31
»	»	»	1,0	9,45	1,55
»	»	»	1,0	11,03	2,16
»	»	»	1,0	12,36	3,00
»	»	1,5	0,5	*	1,52
»	»	»	0,5	4,45	1,76
»	»	»	0,5	5,23	2,17
»	»	»	1,0	*	1,53
»	»	»	1,0	7,61	1,81
»	»	»	1,0	8,99	2,48
»	»	»	1,0	10,30	3,52
»	6	0,5	0,5	*	1,14
»	»	»	0,5	7,29	1,36
»	»	»	0,5	8,31	1,74
»	»	»	1,0	*	1,14
»	»	»	1,0	12,71	1,42
»	»	»	1,0	14,51	2,20
»	»	»	1,0	16,10	3,12
»	»	1,0	0,5	*	1,37
»	»	»	0,5	5,50	1,65
»	»	»	0,5	6,39	2,12
»	»	»	1,0	*	1,37
»	»	»	1,0	9,54	1,73
»	»	»	1,0	11,13	2,61
»	»	»	1,0	12,56	3,79
»	»	1,5	0,5	*	1,62
»	»	»	0,5	4,47	1,97
»	»	»	0,5	5,38	2,56
»	»	»	1,0	*	1,63
»	»	»	1,0	6,90 (1)	1,85
»	»	»	1,0	9,05	2,91
»	»	»	1,0	10,42	4,34

(1) $\left(\frac{\mu_n}{\mu}\right)_{base} \simeq 0{,}005$

* Relutância do ferro desprezável

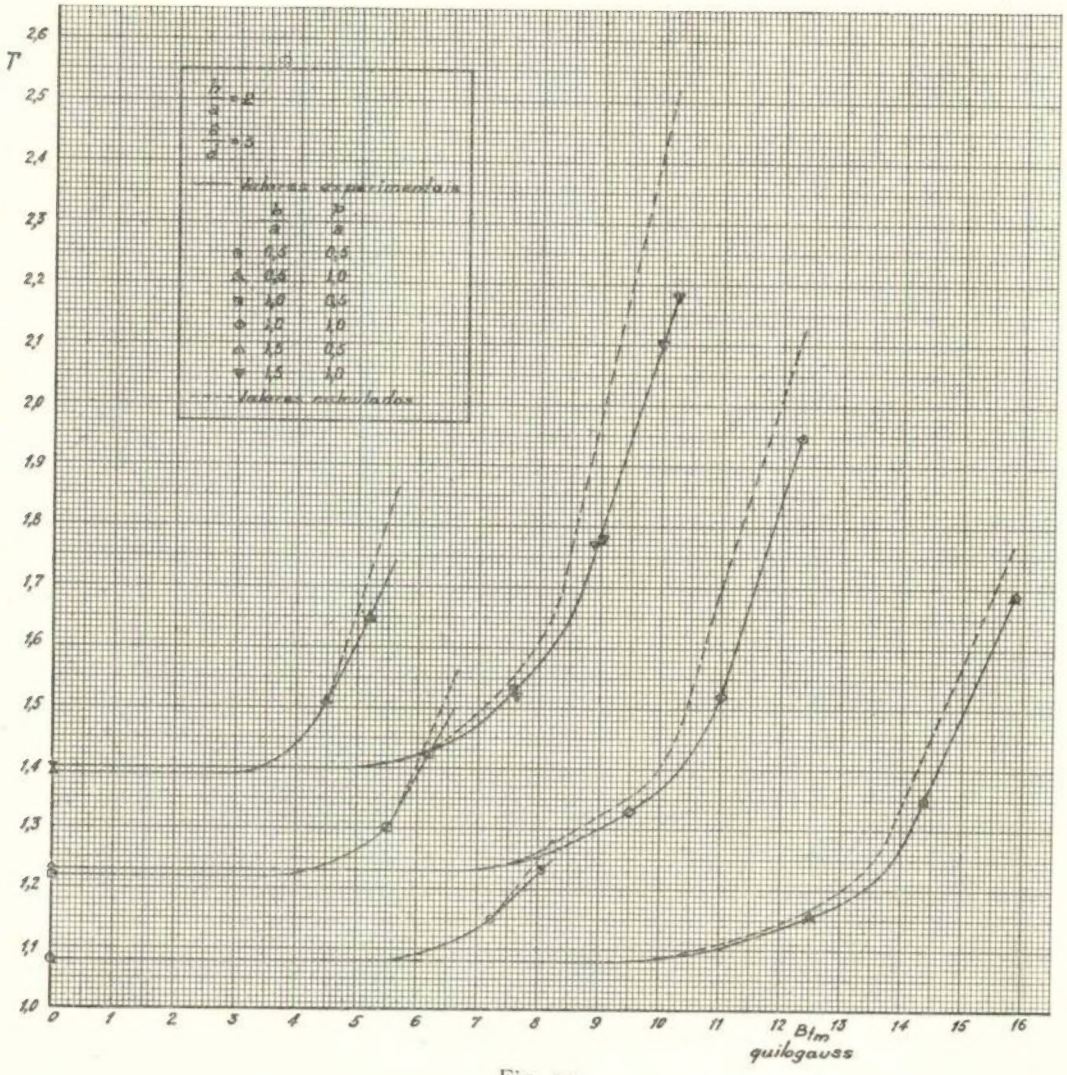

T
2,6
2,5
2,4
2,3
2,2
2,1
2,0
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
Btm
quilogauss
Valores experimentales
Valores calculados

Fig. 32

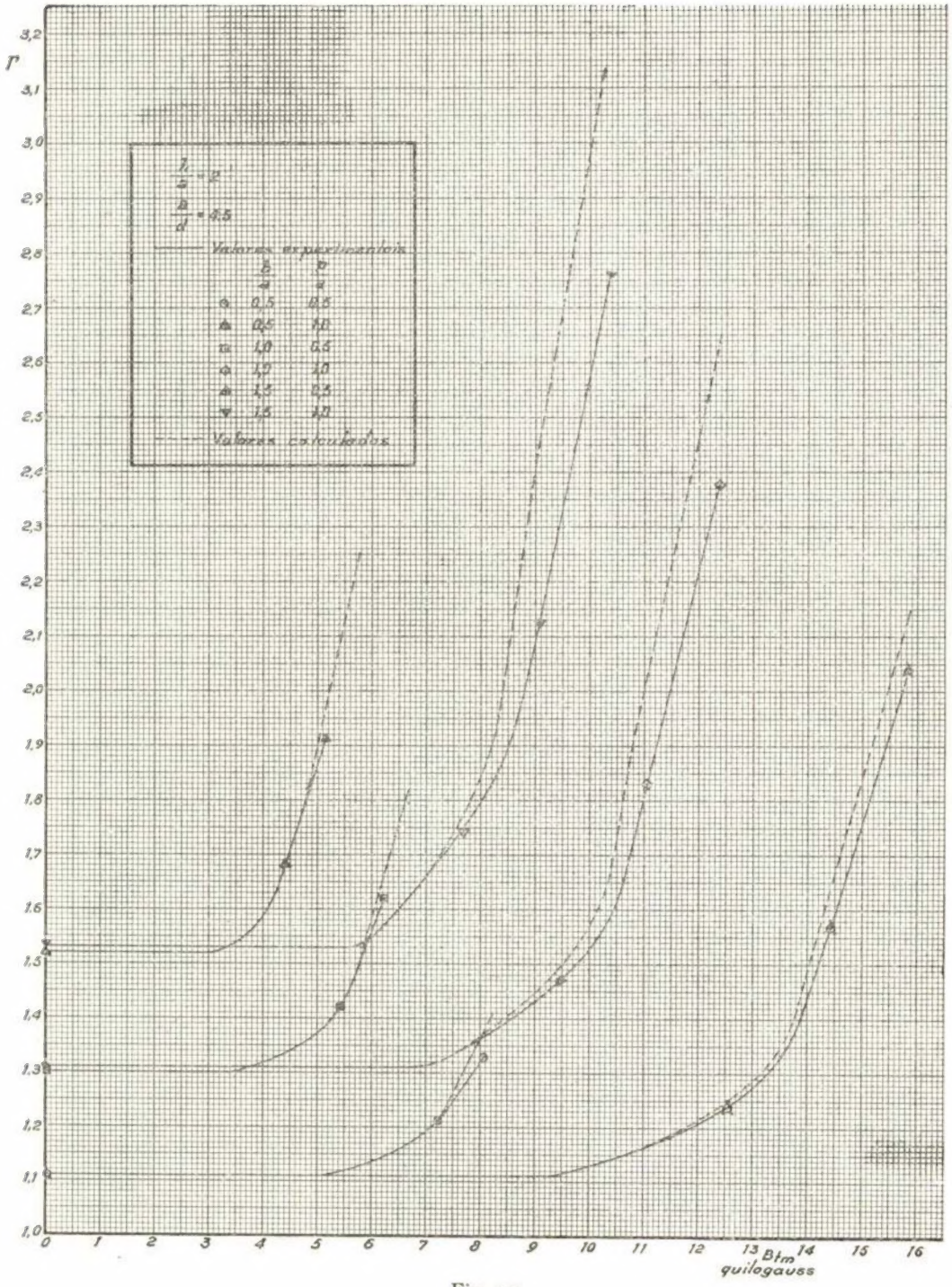


Fig. 33

TÉCNICA
484